

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEI TRASPORTI “LUIGI TOCCHETTI”

CORSO DI DOTTORATO IN INGEGNERIA DEI SISTEMI IDRAULICI, DI TRASPORTO E TERRITORIALI - CICLO XXI

**ANALISI DEL COMPORTAMENTO DELL’UTENTE STRADALE SU
STRADE EXTRAURBANE A DUE CORSIE, A CARREGGIATA UNICA
E A DOPPIO SENSO DI MARCIA**

COORDINATORE DEL DOTTORATO:

CH. MO PROF. ING. BRUNO MONTELLA

COORDINATORE DI INDIRIZZO E TUTOR:

CH. MO PROF. ING. RENATO LAMBERTI

CONTRORELATORE:

CH. MO PROF ING. RAFFAELE MAURO

CANDIDATO:

ING. DOMENICO ABATE

ANNO ACCADEMICO 2008-2009

INDICE

1. PREMESSA	<i>pag.</i> 3
2. INTRODUZIONE	<i>pag.</i> 8
3. OBIETTIVI	<i>pag.</i> 11
4. STATO DELL'ARTE	<i>pag.</i> 13
5. ASPETTI METODOLOGICI	<i>pag.</i> 46
6. INDAGINI SPERIMENTALI	<i>pag.</i> 49
7. ELABORAZIONI DEI DATI	<i>pag.</i> 60
8. MODELLI PREDITTIVI DELLE VELOCITÀ OPERATIVE	<i>pag.</i> 64
9. CONCLUSIONI E SVILUPPI DELLA RICERCA	<i>pag.</i> 149
10. RINGRAZIAMENTI	<i>pag.</i> 154
11. BIBLIOGRAFIA	<i>pag.</i> 154

1. PREMESSA

SCOPI

Il diagramma delle velocità operative è indicato in letteratura come migliore strumento di verifica del “Design consistency” di un tracciato stradale in quanto misura del rispettivo grado di congruenza con le aspettative di regolarità di marcia e sicurezza di un utente.

L’inadeguatezza della velocità di progetto, nel dimensionamento degli elementi geometrici di un tracciato, è ampiamente dimostrata da svariate analisi sperimentali rivolte allo studio delle correlazioni tra caratteristiche geometriche di un’infrastruttura e comportamento di guida di un utente.

Numerose ricerche hanno chiaramente evidenziato che la velocità operativa (V_{85}) è quella che in miglior misura rappresenta il reale comportamento dei conducenti.

In considerazione di ciò, sono stati formulati dei modelli predittivi delle velocità operative.

L’obiettivo del lavoro è quello di studiare il comportamento di guida in relazione alle proprietà dell’ambiente stradale attraversato, su strade extraurbane a due corsie e carreggiata unica, finalizzando la ricerca alla costruzione di diagrammi delle velocità, attraverso:

- la redazione di modelli matematici che siano in grado di prevedere la velocità operativa praticata sull’infrastruttura;
- la validazione di tali modelli su un campione differente da quello di taratura, al fine di valutare in maniera accettabile la riproduzione del fenomeno che s’intende simulare;
- il controllo della coerenza tra i singoli modelli;
- la stima dei tassi di accelerazione e decelerazione e della lunghezza dei tronchi di transizione.

Considerando i dati di velocità relativi ad 8 infrastrutture viarie, i rilievi strumentali forniscono un congruo numero d’informazioni dalle quali sono estratte, mediante apposite procedure di trattamento e filtraggio dei dati, le grandezze statisticamente più rilevanti: tali parametri sono confluiti in database opportunamente strutturati in vista della loro successiva analisi ed elaborazione numerica.

METODI

Da un’attenta lettura della produzione scientifica recente emerge che la velocità di percorrenza è il parametro più diffusamente impiegato per rappresentare il comportamento del conducente rispetto all’ambiente stradale che egli si trova ad attraversare.

La disponibilità di strumenti atti a prevedere le velocità praticate dai guidatori costituisce un indubbio vantaggio, sia nell'ambito progettuale sia nel campo degli interventi di adeguamento delle infrastrutture esistenti.

In entrambi i casi, infatti, l'obiettivo è rendere il tracciato stradale congruente con le aspettative degli utenti, evitando o correggendo le situazioni di disomogeneità nella successione degli elementi stradali, che costituiscono uno dei fattori di sorpresa per l'utente e rappresentano una forte concausa delle condotte di guida errate o pericolose.

L'Ufficio Trasporti della Provincia di Salerno fin dal 1999 ha avviato un'azione di monitoraggio periodico della rete stradale suburbana ed extraurbana, finalizzata alla programmazione di interventi per il riassetto della viabilità provinciale e per il miglioramento della sicurezza stradale. Abbinando alle finalità dell'Ente gli obiettivi specifici della ricerca, sono state progettate, di concerto con il Centro Provinciale di Monitoraggio Sicurezza Stradale, due successive campagne di rilevamento strumentale, realizzate su strade extraurbane a carreggiata unica e doppio senso di marcia.

Le indagini sperimentali dimostrano che le velocità adottate dagli utenti non risultano conformi a quelle di progetto, mentre i limiti di velocità presenti su talune infrastrutture vengono spesso abbondantemente superati. I dati acquisiti nel corso delle campagne consentono di costruire un database utilizzabile per lo studio e l'implementazione di modelli previsionali delle velocità operative: è opinione largamente condivisa che sviluppando modelli siffatti si possa contribuire al miglioramento della qualità della circolazione e, in definitiva, alla riduzione del problema dell'incidentalità, che causa ogni anno ingenti danni umani ed economici.

L'analisi dei dati campionari conferma la notevole dipendenza delle velocità operative dalle caratteristiche geometriche e funzionali dell'elemento sul quale si verificano.

Quest'evidenza empirica, anche alla luce dello stato attuale della ricerca, permette di indirizzare gli sforzi verso l'elaborazione di modelli predittivi distinti per ciascuno degli elementi che compongono il tracciato planimetrico.

La fase dell'elaborazione analitica dei dati sperimentali evidenzia i principali risultati conseguiti. Infatti, saranno presentate separatamente per ogni tipologia di elemento del tracciato le caratteristiche salienti dei modelli di velocità ambientale ed operativa, effettuando una breve disamina conclusiva sui rapporti esistenti tra le formulazioni proposte.

Attraverso l'impiego di metodologie statistiche d'interpretazione dei dati campionari è possibile individuare le variabili indipendenti che concorrono alla formazione della velocità

operativa, riconoscendo tra l'altro le particolari capacità predittive della cosiddetta velocità ambientale (speed environment).

Le fasi seguenti, di specificazione delle espressioni formali e calibrazione dei loro parametri, portano alla formulazione di modelli previsionali delle velocità operative sulle curve e sui rettifili e di un modello per la stima della velocità ambientale lungo i tronchi omogenei.

RISULTATI ATTESI ED OTTENUTI

Le relazioni empiriche proposte sono oggetto di una verifica simultanea, allo scopo di studiare i risultati ottenibili durante la loro applicazione sequenziale.

La coerenza tra i valori forniti dai differenti modelli previsionali rappresenta, infatti, il requisito essenziale per la creazione di un corretto profilo delle velocità operative e, in definitiva, per la valutazione dell'omogeneità di un tracciato stradale.

Successivamente si preferisce adottare una procedura idonea per la fase di validazione dei modelli di previsione delle velocità operative in curva e rettifilo. Tale operazione mira alla valutazione dell'accuratezza che coinvolge i parametri interessati nella regressione dei modelli per verificarne l'idoneità nella simulazione delle reali circostanze che prendono vita in sito.

In particolare, attraverso l'utilizzo di parametri statistici sintetici e strumenti di controllo, si testa la validità dei modelli tarati su un campione differente da quello di taratura in quanto in possesso di caratteristiche simili al campione di taratura.

Le misure di velocità inoltre sono finalizzate al tracciamento di diagrammi continui lungo i tronchi di transizione rettifilo – curva – rettifilo dai quali sono desunte:

- le lunghezze degli stessi tratti;
- la ripartizione percentuale di questi tra curve e rettifili; nonché
- i tassi di accelerazione e decelerazione medi.

La conquista di questi risultati concede l'opportunità di calibrare e validare idonei modelli di previsione delle velocità nelle zone di transizione e consente di costruire un profilo di velocità completo che cerca di riflettere la reale percezione del tracciato da parte dell'utente.

Alla luce di quanto è stato detto, si arguisce che l'elaborazione di modelli previsionali della velocità operativa riveste un crescente interesse nel campo delle infrastrutture stradali. Si tratta di un'operazione notevolmente complessa, che dev'essere supportata da un cospicuo numero d'informazioni sperimentali, opportunamente scelte per il conseguimento degli scopi proposti.

L'ampliamento degli archivi di dati nel corso del tempo ha permesso di raggiungere un progressivo perfezionamento delle relazioni empiriche, che, rappresentando il risultato di un

processo inferenziale di regressione su campioni spesso molto ampi, tendono ad assumere una validità generale, non legata alla singolarità delle specifiche strade monitorate.

L'opportunità di accrescere ulteriormente le basi di dati disponibili, grazie all'inserimento delle misure di traffico realizzate nell'anno 2007, lascia prevedere diversi potenziali sviluppi:

- incrementare la casistica riguardante i tronchi omogenei ed approfondire il problema della formazione della velocità ambientale;
- validare ulteriormente ed in progress i modelli proposti, cioè stabilire con metodologie statistiche se i valori da essi ottenibili approssimano in misura soddisfacente i dati sperimentali relativi alle altre strade oggetto di future osservazioni e rilievi, che man mano contribuiscono all'accrescimento ed all'implementazione del database di riferimento dei modelli, ovvero se bisogna porre ulteriori restrizioni alla loro applicabilità;
- eseguire analisi particolareggiate, ad esempio effettuando una separazione fra strade statali e provinciali, per tener conto dell'eventuale diversità di comportamento degli utenti e di caratteristiche geometrico - funzionali sui tipi di strade.

La dimensione del campione, dunque, riveste una grande importanza non solo nell'estensione del campo di validità dei modelli, ma anche per le implementazioni riguardanti la validità e l'efficacia delle formulazioni proposte in relazione all'abbattimento del fenomeno di incidentalità stradale ed alla sicurezza in genere della circolazione sulle infrastrutture di trasporto terrestri a guida libera.

Tuttavia, l'intero processo analizzato non riesce a cancellare il carattere "locale" delle elaborazioni. Infatti, il contesto territoriale nel quale i dati vengono acquisiti non solo concorre alla formazione di alcune caratteristiche ambientali delle infrastrutture, ma riflette anche specifici atteggiamenti ed abitudini di guida dei conducenti.

A completamento degli studi svolti finora, sarebbe utile approfondire l'analisi del comportamento dell'utente lungo le zone di transizione, con l'obiettivo d'individuare un procedimento sperimentale per la stima dei tassi di accelerazione e di decelerazione, così da giungere al perfezionamento del diagramma delle velocità operative sull'intero tracciato stradale.

L'auspicio maggiore, da parte di quanti operano in questo campo della ricerca e anche dello scrivente, è che i risultati conseguiti e le tecniche messe a punto trovino un'adeguata diffusione, riscuotendo in speciale modo l'interesse degli Enti gestori delle infrastrutture viarie.

Tali condizioni costituirebbero il principio per l'adozione di iniziative come quelle intraprese tra la Provincia di Salerno – Centro di Monitoraggio Sicurezza Stradale, diretto dall'ing. Giovanni Coraggio, e l'Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti “Luigi Tocchetti”, diretto dal prof. ing. Renato Lamberti, e, soprattutto, per la nascita di fattive collaborazioni tra Enti, Università ed Istituti di ricerca, nel comune intento di migliorare la qualità dell'offerta di trasporto e, soprattutto, di garantire una sempre maggiore sicurezza nella circolazione stradale.

2. INTRODUZIONE

La progettazione geometrica di una strada consiste nel definire l'intero sviluppo del nastro stradale attraverso lo studio dell'andamento plano-altimetrico della sua linea d'asse e l'identificazione della sezione trasversale. Il progetto stradale viene dunque sviluppato in *fasi* successive e, quindi, si definiscono:

- un tracciato orizzontale, mediante l'individuazione degli elementi planimetrici (rettifili, curve circolari, curve di transito a raggio variabile);
- un profilo longitudinale, caratterizzato dagli elementi verticali (livellette, raccordi verticali: dossi e sacche);
- la sezione trasversale, funzione della categoria della strada e del territorio attraversato;
- le eventuali interconnessioni con le altre infrastrutture esistenti (intersezioni a raso, a rotatoria, a livelli sfalsati).

Un buon progetto geometrico, oltre a soddisfare strettamente il bisogno di mobilità, dovrebbe tener conto anche di alcuni rilevanti *requisiti* richiesti alla strada:

- garantire un elevato grado di sicurezza e di comfort di guida;
- rispettare l'ambiente naturale e gli insediamenti umani, specie se di particolare rilevanza storico-paesaggistica;
- richiedere un impegno economico compatibile con i vantaggi traibili dall'opera stessa.

Per assicurare le esigenze di sicurezza e regolarità di marcia, il progettista deve realizzare un tracciato che sia il più possibile *omogeneo*, in cui cioè i diversi elementi si susseguano in maniera armoniosa e rispondente alle aspettative degli utenti: si parla, pertanto, di *design consistency*, ovvero, di *congruenza* del tracciato stradale.

In questa prospettiva, le ricerche scientifico-sperimentali degli ultimi decenni in tema di progettazione e sicurezza stradale, si sono concentrate principalmente sull'interazione uomo-strada, cioè, sul rapporto tra il soggetto che esprime la domanda di trasporto e l'infrastruttura che costituisce l'offerta per soddisfarla. L'uomo, infatti, con la propria condotta di guida, la sua percezione della strada e le decisioni prese in risposta agli stimoli esterni, è il principale responsabile della sicurezza nella circolazione stradale. La sequenza degli elementi lungo il tracciato, d'altronde, è di fondamentale importanza poiché, laddove non corrispondo alle attese dell'utente, l'attività di guida diventa più complessa, i tempi di percezione e reazione aumentano e

la risposta del conducente può risultare inadeguata anche in condizioni psico-fisiche normali, generando comportamenti potenzialmente pericolosi ed, in definitiva, aumentando il rischio di incidente.

Dall'analisi della letteratura scientifica di riferimento su tali problematiche, emerge che il comportamento dell'utente in relazione alle caratteristiche geometriche della strada può essere significativamente riferito alla reale velocità di marcia praticata dagli utenti stradali (i guidatori). In altre parole, la velocità con la quale il conducente percorre un dato elemento geometrico o un tratto omogeneo di strada, consente di "spiegare" buona parte del rapporto uomo-infrastruttura, di valutare il comportamento dei guidatori e di esprimere giudizi circa la bontà di un progetto stradale.

Diverse definizioni di velocità esistono nei vari riferimenti bibliografici ed impianti normativi, ciascuna caratterizzata da un valore, o da un metodo di valutazione, nonché da uno specifico impiego, variabili da una nazione all'altra.

Per il dimensionamento degli elementi plano-altimetrici, l'approccio tradizionalmente usato si basa sull'adozione di un valore di *velocità di progetto* (*design speed*) indicato dalla normativa di riferimento. Partendo dalla fisica del cinematismo dei veicoli e sfruttando le nozioni di meccanica della locomozione e di psicologia della visione, vengono costruiti quei modelli semplificati che le stesse norme suggeriscono di impiegare nella definizione geometrica degli elementi stradali.

Le verifiche della congruenza di un tracciato si basano, in molti casi, sulla misura della differenza tra le *velocità operative* praticabili sugli elementi contigui, ovvero della differenza tra velocità di progetto e velocità operativa su un medesimo elemento: si tratta di valutare l'entità delle variazioni di velocità che, per un buon progetto, dovrebbero essere contenute in un intervallo piuttosto ristretto (criteri di Lamm).

Le *velocità operative*, inoltre, costituiscono il parametro di riferimento in tutte le azioni di monitoraggio stradale, confermato anche dalle norme per l'adeguamento delle strade esistenti. La valutazione dei tratti critici della rete stradale e la scelta degli interventi di adeguamento da realizzare, presuppongono la conoscenza delle velocità praticate dagli utenti, da acquisire con periodiche campagne di sperimentazione e rilevamento.

La velocità, quindi, assume un ruolo cardine tanto nell'ambito progettuale quanto nel campo della sicurezza e del controllo viario. Questo riconoscimento ha spinto tutti i Paesi a forte motorizzazione (si ricorda che in Italia l'indice di motorizzazione è del 59%, circa 6 veicoli ogni 10 abitanti!) a promuovere numerose ricerche ed indagini sperimentali rivolte a studiare le velocità realmente praticate dagli utenti lungo le infrastrutture, per poi stabilire delle relazioni, solitamente

formalizzate in espressioni matematiche, tra queste e le caratteristiche geometriche ed infrastrutturali della strada ed il traffico veicolare che carica la rete stessa.

È importante sottolineare il riferimento alle velocità *reali*, ossia rappresentative dell'effettivo comportamento degli utenti. Le ricerche in materia, infatti, hanno evidenziato che la sola velocità di progetto non consente di disegnare un tracciato sufficientemente sicuro per gli utenti che la percorrono. D'altra parte è oramai ampiamente diffuso ed accreditato il concetto di velocità operativa che, interpretando meglio il fenomeno reale, darebbe luogo a tracciati di gran lunga più congruenti. Invero, la velocità operativa (o V_{85}) viene definita come l'85mo percentile della distribuzione delle velocità dei veicoli isolati, rilevate su un elemento del tracciato stradale o su un tronco omogeneo di strada, in condizioni di luce diurna, pavimentazione buona e asciutta, e serene condizioni metereologiche.

In definitiva, i tradizionali principi della progettazione stradale, pur se fondati su osservazioni teoriche e analitiche di validità generale, non sono in grado di rappresentare le differenze decisionali tra i diversi utenti. Nasce da ciò l'esigenza di studiare le infrastrutture viarie considerando contemporaneamente all'approccio analitico - deduttivo precedentemente citato, un altro che potremmo definire "induttivo", basato sull'inferenza delle scelte operate dagli utenti. I moderni mezzi di acquisizione e di elaborazione dei dati, unitamente ai metodi messi a disposizione dalle scienze statistiche, consentono di elaborare modelli che correlano le caratteristiche geometriche delle strade all'effettivo comportamento dell'utenza tramite relazioni di tipo empirico, cioè ricavate sulla base di osservazioni effettuate su strada.

Una parte dello sforzo scientifico e sperimentale è dunque rivolto alla definizione di modelli previsionali delle velocità operative, da usare come supporto nella progettazione stradale. In questo modo, di fatto, l'opera viene concepita in funzione del comportamento reale dell'uomo, intessendo uno stretto rapporto tra andamento geometrico ed aspettative dell'utente, condizione essenziale per una progettazione moderna ed omogenea.

3. OBIETTIVI

Il presente lavoro si inserisce in un lavoro di ricerca di più ampia portata avviato sin dal 1999 dal *Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti “Luigi Tocchetti”* dell’Università degli Studi di Napoli Federico II in collaborazione col *Centro Provinciale di Monitoraggio della Sicurezza Stradale* dell’ente Provincia di Salerno. Esso si propone di individuare un modello generale di previsione delle velocità effettivamente attuate dagli utenti, a partire da un congruo numero di osservazioni sperimentali condotte su strade extraurbane a carreggiata unica, due corsie e doppio senso di marcia. Il conseguimento di questa finalità, da un lato consentirebbe di conoscere il profilo delle velocità operative lungo l’intero tracciato stradale in funzione delle caratteristiche geometriche, delle caratteristiche ambientali e del traffico veicolare; dall’altro permetterebbe di effettuare le dovute verifiche di congruenza con riferimento ad una situazione prossima a quella reale, con notevole aumento della sicurezza nella circolazione.

Nel presente lavoro di ricerca sono stati perseguiti tre obiettivi specifici. Innanzitutto, si è cercato di compendiare ed ampliare in un’unica opera il lavoro svolto in precedenza, provvedendo ad un’organizzazione sistematica e scrupolosa degli archivi preesistenti e che man mano nel corso di questi anni si è ampliato. In secondo luogo, sono stati sottoposti ad una revisione critica e ad una conseguente rielaborazione *in progress* i modelli che nel corso del tempo venivano ad ampliare il database di riferimento, così da pervenire ad espressioni che fossero sempre più attendibili, se non addirittura più significative. Questo risultato è stato raggiunto sia in virtù di un ulteriore e più metodico *screening* dei dati in corso d’opera; sia grazie all’estensione del monitoraggio a nuove strade che ha comportato l’ampliamento del suddetto database di riferimento. Infine, si è voluto realizzare un “coordinamento” tra i modelli di velocità operativa afferenti ad elementi distinti del tracciato planimetrico, onde garantire continuità e “coerenza” tra gli stessi e conseguente validazione sulle strade successivamente rilevate: requisiti, questi, che li rendono applicabili alle strade esistenti e di progetto con simili caratteristiche geometriche e funzionali per la costruzione del profilo delle velocità realmente attuate dai guidatori.

Come si è detto, gli studi effettuati ed i relativi modelli proposti si riferiscono alle strade secondarie extraurbane a due corsie a doppio senso di marcia (strade C ed F, come da classificazione funzionale del Nuovo Codice della Strada N.C.d.S. D.Lgs. n. 285 del 30 aprile

1992), scelta dettata dalla notevole estensione di questi tipi di strade rispetto all'intera rete nazionale, nonché dall'elevato indice di mortalità che esse presentano¹.

La collaborazione con il CPMSS della Provincia di Salerno, da anni impegnato nel monitoraggio strumentale della rete stradale di propria competenza, ha permesso di progettare e realizzare diverse campagne di indagini aventi le finalità sopra descritte, con riferimento alle infrastrutture della realtà territoriale salernitana.

La descrizione della ricerca nel suo complesso, l'esposizione delle modalità secondo cui è stata condotta, l'esame degli specifici temi affrontati in questa tesi, saranno oggetto di trattazione nel paragrafo successivo.

¹ Nell'anno 2006, sulle strade extraurbane ad una carreggiata a doppio senso si sono registrati 6,88 decessi ogni 100 incidenti, contro valori dell'indice di mortalità pari a 4,4 sulle autostrade e ad 1,3 sulle strade urbane [fonte ISTAT].

4. STATO DELL'ARTE

Gli studi condotti negli ultimi 50 anni nel campo della progettazione e dell'esercizio delle infrastrutture viarie, hanno riguardato molteplici aspetti, talvolta complementari tra loro.

Nell'ambito di questa ricerca, si è ritenuto necessario un approfondimento bibliografico su due temi principali: la valutazione della congruenza dei tracciati e la determinazione delle velocità operative attraverso modelli di previsione.

La congruenza di un tracciato, com'è stato già detto, rappresenta la tendenza dell'infrastruttura a soddisfare le aspettative dell'utente in termini di regolarità e sicurezza di marcia. In accordo con quanto affermato, l'analisi dei documenti raccolti ha consentito di evidenziare due criteri, normalmente impiegati in quasi tutti i paesi, per controllare la congruenza. Preliminarmente è necessario, per maggior chiarezza, definire la velocità di progetto e quella operativa.

La *velocità di progetto* (*design speed*) V_P (V_d) è la velocità con la quale si definiscono le caratteristiche geometriche (raggi delle curve orizzontali e verticali, distanze di visibilità, curve di raccordo progressive, ecc.) del tracciato. Il legame fra la velocità di progetto e le caratteristiche geometriche viene stabilito mediante modelli teorici semplificati.

La *velocità operativa* (*operating speed*) V_{85} è la velocità praticata dagli utenti. Essendo quest'ultima una variabile aleatoria, come misura della velocità operativa associata ad un elemento o ad un tronco omogeneo di un tracciato, viene assunto l'85mo percentile della distribuzione delle velocità delle sole autovetture rilevate sull'elemento stesso in condizioni di flusso libero, pavimentazione buona e asciutta e luce diurna. Le relazioni che legano la velocità operativa alle caratteristiche geometriche sono di tipo empirico, ricavate dalle osservazioni effettuate sulla strada.

Il primo criterio di verifica della congruenza di un tracciato, mira al raggiungimento della compatibilità attraverso il confronto tra la velocità di progetto V_p di un elemento o di un tronco stradale e la corrispondente velocità operativa V_{85} . Esso, basandosi sullo studio del comportamento dell'utente in determinate situazioni geometriche del tracciato e sull'analisi dell'incidentalità, individua dei valori di riferimento della differenza tra la velocità di progetto di un elemento a curvatura costante (curva, rettilineo) e la corrispondente velocità operativa dell'elemento. Gli studi di Lamm di riferimento nella normativa tedesca del 1995, presentano tre situazioni, riassunte nella seguente Tabella 1:

Tabella 1 Primo criterio di Lamm per la Verifica dell'Andamento Planimetrico.

I CRITERIO DI LAMM	
<i>Livello di progettazione</i>	<i>Intervallo raccomandato</i>
<i>Buono</i>	$ V_{85} - V_p \leq 10 \text{ km/h}$
<i>Tollerabile</i>	$10 \text{ km/h} < V_{85} - V_p \leq 20 \text{ km/h}$
<i>Non adeguato</i>	$ V_{85} - V_p > 20 \text{ km/h}$

Nel primo caso non sono necessarie correzioni al progetto. Le velocità sono perfettamente bilanciate anche nelle situazioni critiche nelle curve con raggio minimo.

Nel secondo caso è consigliabile limitare la velocità dell'utente attraverso limiti di velocità imposti dalla segnaletica orizzontale e/o verticale o con opportune apparecchiature per il controllo del traffico. In ogni caso sarà opportuno utilizzare la velocità V_{85} per le verifiche di visibilità e per quelle di stabilità in curva onde assicurare lo stesso rapporto tra la domanda di aderenza e quella disponibile prevista per la velocità di progetto.

Nel terzo caso la forte differenza tra le due velocità comporta una situazione di possibile pericolo. Sarà necessario modificare la linea d'asse ricalcolando gli elementi geometrici interessati. Se ciò non fosse possibile bisogna garantire velocità più basse con interventi efficaci.

Il secondo criterio mette a confronto le velocità operative di elementi che si susseguono in un tracciato ($V_{85\ i}$ e $V_{85\ i+1}$). Si tratta di verificare che la differenza tra le velocità di due elementi contigui sia contenuta entro limiti stabiliti. Questa verifica sarà tanto più importante nelle zone di transizione, tra tronchi stradali ideati, per ragioni topografiche, per velocità sensibilmente diverse. Anche per questa verifica di congruenza Lamm ha individuato tre condizioni:

Tabella 2 Secondo Criterio di Lamm per la Verifica dell'Andamento Planimetrico.

II CRITERIO DI LAMM	
<i>Livello di progettazione</i>	<i>Intervallo raccomandato</i>
<i>Buono</i>	$ V_{85i} - V_{85i+1} \leq 10 \text{ km/h}$
<i>Tollerabile</i>	$10 \text{ km/h} < V_{85i} - V_{85i+1} \leq 20 \text{ km/h}$
<i>Non adeguato</i>	$ V_{85i} - V_{85i+1} > 20 \text{ km/h}$

In analogia con quanto stabilito dal I criterio precedente, nel primo caso viene presentata una situazione geometrica del tracciato che per l'utente rappresenta la situazione ideale. Il secondo caso potrebbe generare, per alcuni utenti, situazioni di difficoltà: normalmente si interviene con alcune misure per il controllo della velocità.

Il terzo caso individua un grave difetto nella planimetria che potrebbe costituire un pericolo per l'utenza: in tale situazione è consigliabile eliminare l'incongruenza con la modifica del progetto.

Lo stesso Lamm, inoltre, ha formulato un terzo criterio di congruenza attraverso il quale viene confrontata l'*aderenza trasversale disponibile* f_{id} – ritenuta pari a quella assunta in fase di progetto, sulla scorta di quanto stabilito dalle norme – con l'*aderenza trasversale richiesta* f_{tr} ; quest'ultima potrebbe, infatti, risultare maggiore, in quanto le velocità operative risultano spesso maggiori di quelle di progetto. I tre casi che si possono presentare sono i seguenti:

Tabella 3 Terzo Criterio di Lamm per la Verifica dell'Andamento Planimetrico.

III CRITERIO DI LAMM	
<i>Livello di progettazione</i>	<i>Intervallo raccomandato</i>
<i>Buono</i>	$f_{id} - f_{tr} \geq 0,01$
<i>Tollerabile</i>	$-0,04 \leq f_{id} - f_{tr} < 0,01$
<i>Non adeguato</i>	$f_{id} - f_{tr} < -0,04$

I suddetti criteri proposti da Lamm per la verifica della sicurezza (*Safety Criteria*) sono accettati a livello nazionale ed internazionale come strumento di “diagnosi”, per rilevare eventuali

disomogeneità che possano dar luogo a comportamenti di guida pericolosi che generano insicurezza stradale.

Esistono anche altri metodi di controllo della compatibilità di elementi in sequenza con caratteristiche geometriche diverse. Quasi tutte le norme vigenti nei vari paesi, ad esempio, prevedono l'uso di grafici che forniscono il rapporto tra i valori dei raggi delle curve che si susseguono nel tracciato. Questi vincoli hanno l'obiettivo di assicurare variazioni minime delle velocità operative sui tratti in curva. Gli stessi grafici, o talvolta delle relazioni aggiuntive, prescrivono anche il raggio minimo che è necessario imporre dopo un lungo rettilineo. In ogni caso, la verifica può essere efficacemente completata solo attraverso la costruzione e l'esame dei profili delle velocità operative nelle due direzioni di marcia.

Di seguito si riporta una specifica rassegna delle procedure e dei principali metodi di verifica della congruenza del tracciato adottati nell'ambito delle normative vigenti in alcuni Paesi stranieri mutate dai risultati delle ricerche svolte da numerosi studiosi nei rispettivi ambiti nazionali.

Alla fine degli anni settanta e nei primi anni ottanta in *Germania* furono condotti degli studi volti ad investigare le relazioni tra le caratteristiche geometriche del tracciato stradale e la reale velocità tenuta dagli utenti stradali. I risultati di questi studi portarono all'introduzione, nella normativa del 1984, della velocità operativa, ed al suo utilizzo per le verifiche di congruenza del tracciato. La normativa attuale, pubblicata nel 1995 *Richtlinien für die Anlage von Strassen*, riprende in modo sostanzialmente immutato l'impostazione dell'edizione precedente, anche se uno studio successivo ha aggiornato i risultati degli studi precedenti.

La velocità di progetto, funzione della categoria di strada, è utilizzata per fissare i valori minimi degli elementi geometrici su un tratto di strada. È ritenuto opportuno che la velocità di progetto sia mantenuta costante per lunghi tratti di strada, a meno che non intervengano evidenti variazioni al contorno, ad esempio nell'ambiente attraversato o nella destinazione d'uso. La velocità operativa è, invece, utilizzata in un secondo momento, per dimensionare la pendenza trasversale in curva e la distanza di visibilità per l'arresto e per il sorpasso, nonché per verificare la congruenza del tracciato.

Poiché i risultati degli studi hanno messo in evidenza che, sulle strade extraurbane ad unica carreggiata a due corsie, le velocità operative rimanevano relativamente costanti lungo tratti con caratteristiche geometriche simili, e che essa è molto correlata alla loro tortuosità media, nella

normativa è stata adottata una procedura che prevede, per questo tipo di strade, di stimare la velocità operativa su tratti che presentano caratteristiche uniformi e omogenee.

La normativa, tuttavia, non fornisce criteri oggettivi per dividere il tracciato di progetto in tratti con caratteristiche uniformi, lasciando al progettista il compito della scelta.

Ottenuta la tortuosità media sui vari tratti in cui è stato diviso il tracciato, previa valutazione del tasso di curvatura media o *Curvature Change Rate CCR* [gon / km], è possibile valutare su ognuno dei singoli tronchi stradali la velocità operativa utilizzando il diagramma nella seguente figura, che, in caso di necessità, può essere utilizzato anche per una singola curva.

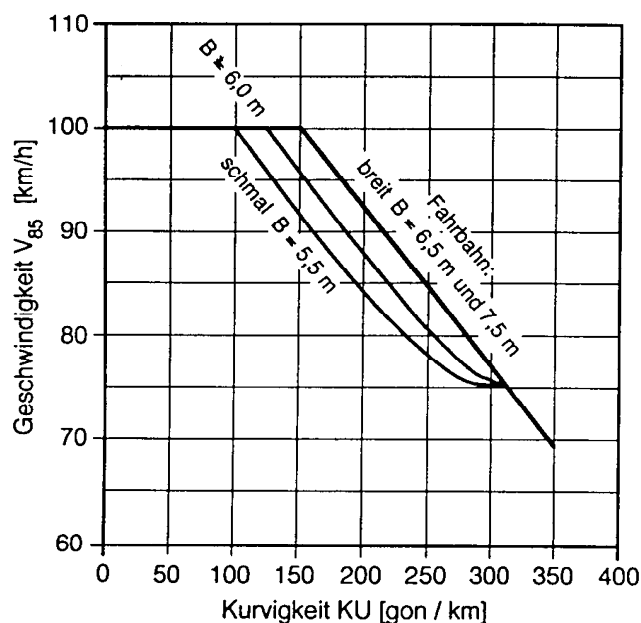


Figura 1 Normativa tedesca, V_{85} in funzione della curvatura media.

Per le strade extraurbane a due o più corsie per senso di marcia non venne, invece, trovata una relazione soddisfacente tra la velocità operativa e la tortuosità media, a causa dell'andamento planimetrico di questo tipo di strade, generalmente molto generoso; i pochi studi condotti indicarono, infatti, una diminuzione molto lieve della V_{85} con il crescere della curvatura. Fu quindi adottato un sistema empirico per il calcolo della velocità operativa V_{85} che, per velocità di progetto V_p minori o uguali a 100 km/h, si assume pari a $V_p + 20 \text{ km/h}$, e per V_p maggiori di 100 km/h, si assume pari a $V_p + 10 \text{ km/h}$; per assicurare la congruenza del tracciato, le velocità operative di due tratti successivi non devono differire per più di 10 km/h. Nella normativa del 1984 era anche richiesto che la differenza tra la velocità operativa e la velocità di progetto non superasse i 20 km/h; questo controllo è stato eliminato nell'edizione attuale, pur restando vigente la raccomandazione generica che le due velocità devono mantenere un rapporto ammissibile, motivando la scelta con la

difficoltà nel trovare una relazione oggettiva tra la V_{85} relativa ad un tratto di tracciato e la corrispondente V_p .

La normativa attualmente in vigore in *Francia* è stata pubblicata nel 1994 ed ha sostituito la precedente edizione del 1970, rispetto alla quale presenta un'impostazione completamente nuova: si riconosce, infatti, l'influenza del tracciato, nella sua globalità, nelle scelte operate dall'utente, introducendo nuove regole di progettazione desunte da studi sull'incidentalità e volte a garantire la compatibilità delle velocità realmente mantenute dagli utenti sugli elementi del tracciato.

L'aggiornamento si è reso necessario per adeguare la normativa ai più recenti risultati delle ricerche nel campo dell'interazione tra le caratteristiche dell'infrastruttura e la sicurezza della circolazione, riassunti in un documento pubblicato nel 1992. Sulla base di questi risultati sono state individuate delle raccomandazioni completamente nuove, tra le quali le regole per verificare la compatibilità, sulla sequenza degli elementi geometrici, e quelle per confrontare le distanze di visibilità richieste con quelle disponibili, per determinare le quali è introdotto il concetto di *velocità operativa*. Tali regole sono molto semplici, e sostanzialmente si riducono a delle relazioni tra la *lunghezza dei rettifili* ed i *raggi delle curve* poste alla loro estremità, ed alla relazione $0,67 \leq R1 / R2 \leq 1,5$ tra i raggi di due curve che si susseguono lungo il tracciato, che deve essere rispettata qualunque sia la distanza che le separa, ad eccezione del caso in cui entrambi i raggi sono maggiori di 500 m.

Come già detto, la velocità operativa V_{85} è stata introdotta nella normativa, ma non è usata per verificare la congruenza del tracciato, riservando il suo utilizzo alla verifica delle sole distanze di visibilità.

Sulla base dei risultati di uno studio condotto in Francia, è possibile calcolare la V_{85} in funzione del raggio di curvatura, della pendenza longitudinale e della sezione trasversale. Nella seguente figura è presentato il diagramma che, in funzione del raggio di curvatura e della sezione trasversale della strada, permette di ricavare la velocità operativa V_{85} .

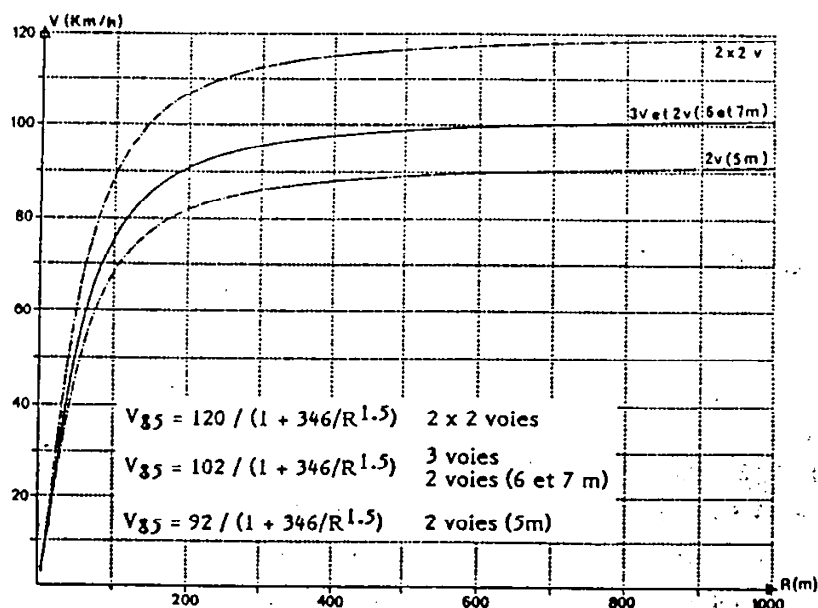


Figura 2 Normativa francese, determinazione della velocità operativa.

La velocità operativa interviene in due sole raccomandazioni. La prima fissa che la minima lunghezza che deve avere un rettifilo interposto tra due curve aventi la medesima curvatura sia pari alla distanza percorsa in 3 secondi alla V_{85} della curva di raggio maggiore tra le due; la seconda richiede una distanza di visibilità del ciglio interno all'ingresso della curva, calcolata dall'inizio dell'arco di cerchio, pari alla distanza percorsa in 3 secondi alla V_{85} attuata a monte della curva stessa, per permettere all'utente una corretta percezione della curva stessa e spazi adeguati per adattare la traiettoria e la velocità.

L'attuale normativa del *Regno Unito* TD 9/93 è un aggiornamento della precedente ed innovativa rispetto alla precedente TD 9/81, basata sui risultati di vari studi condotti in Gran Bretagna alla fine degli anni '70, relativi alla sicurezza stradale e alle relazioni con velocità, traffico e geometria del tracciato.

La normativa TD 9/81 ha introdotto l'uso della velocità operativa V_{85} come velocità di progetto, per poter garantire la congruenza del tracciato in relazione alle aspettative dell'utente; contrariamente alla maggior parte delle altre normative, quella inglese non prevede l'adozione di velocità di progetto legate ad una classifica funzionale delle strade, ma prende in considerazione direttamente la velocità operativa, rappresentativa di quelle realmente praticate dagli utenti, legandola a parametri geometrici del tracciato, ad esempio le pendenze trasversali e longitudinali, il numero di accessi, le distanze di visibilità.

Il modello, fornito per calcolare la velocità di progetto in funzione delle caratteristiche della strada, deriva da studi che hanno posto in evidenza gli elementi da cui dipende la velocità media V_{50} e, conseguentemente, la V_{85} , assunta pari a $1,19 \cdot V_{50}$; in particolare, la velocità operativa in curva è funzione delle caratteristiche del tracciato cui la curva appartiene, perché queste inducono l'utente ad impostare una certa velocità, che tende poi a mantenersi costante lungo la strada, riducendosi solo di poco in fase di ingresso in curva. Basandosi su tale principio sono state elaborate delle relazioni, in seguito razionalizzate e semplificate da studi successivi, per ottenere la procedura proposta nella normativa attuale, che permette di calcolare la velocità di progetto in tratti di strada con caratteristiche uniformi e della lunghezza minima di 2 km.

La velocità di progetto dipende da due parametri, caratteristici del tratto di strada analizzato: la costante AC (Alignment Constraints), che è funzione della curvatura media e della media armonica delle distanze di visibilità disponibili nel tratto omogeneo considerato, e la costante LC (Layout Constraints), che è funzione della sezione trasversale della strada e del numero di intersezioni ed alla presenza di accessi non controllati. In base a queste due costanti è possibile, come mostra la seguente figura, ottenere le velocità di progetto e, quindi, la classe di appartenenza della strada.

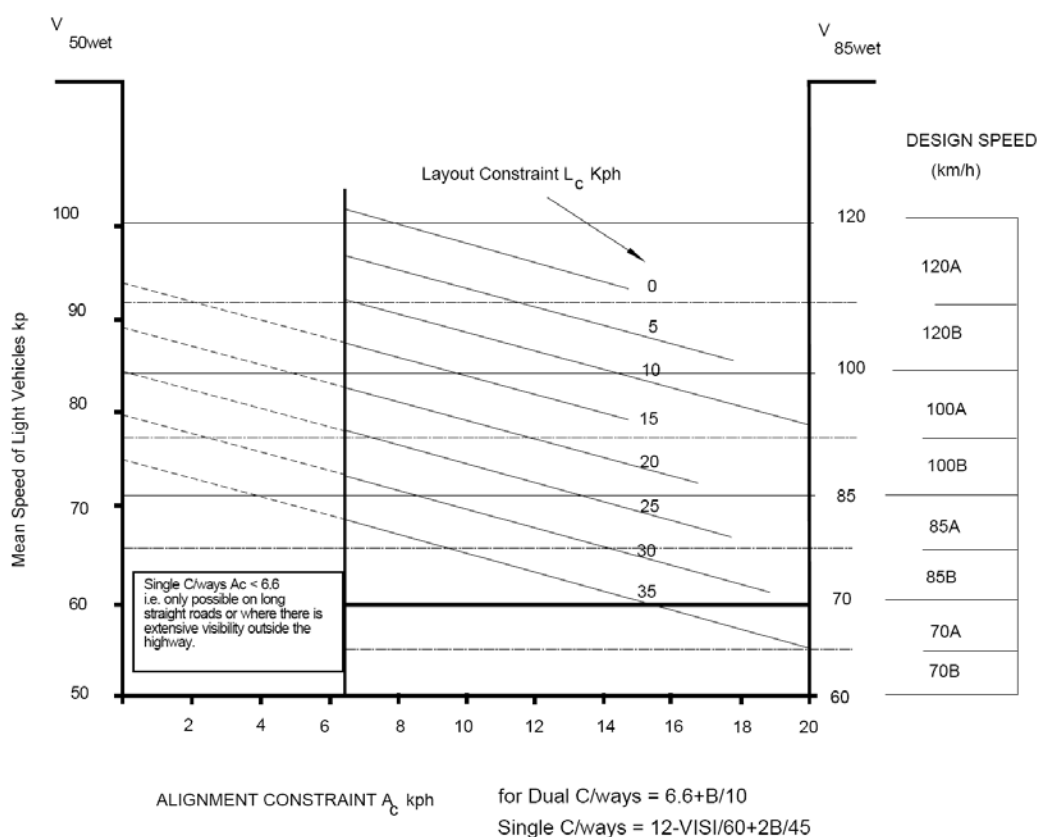


Figura 3 Normativa inglese, velocità di progetto e classi di appartenenza.

Il processo iterativo di progettazione prevede il calcolo della velocità di progetto del tracciato di primo tentativo: le caratteristiche di tutti gli elementi geometrici costituenti il tracciato (raggi delle curve orizzontali, raggi dei raccordi verticali, distanze di visibilità) vanno, quindi, confrontati con i valori limite fissati dalla normativa per la classe corrispondente alla velocità di progetto; se la verifica non dovesse essere soddisfatta, il tracciato è modificato e nuovamente esaminato. Il processo risulta pertanto ciclico fino all'ottimizzazione. La normativa prevede la possibilità di scendere sotto i valori limite usuali, utilizzando quelli di una delle classi inferiori (relaxations). Nel caso venga proposta questa soluzione, la normativa si limita a richiedere al progettista un confronto con una soluzione che utilizzi i valori minimi desiderabili, specificando le ragioni della scelta.

Il minimo raggio di curvatura che la normativa consente di utilizzare in condizioni normali è il “desirable minimum radius” ed è elencato nella seguente tabella in funzione della velocità di progetto.

DESIGN SPEED kph	120	100	85	70	60	50	V ² /R
STOPPING SIGHT DISTANCE m							
Desirable Minimum	295	215	160	120	90	70	
One Step below Desirable Minimum	215	160	120	90	70	50	
HORIZONTAL CURVATURE m.							
Minimum R* without elimination of Adverse Camber and Transitions	2880	2040	1440	1020	720	520	5
Minimum R* with Superelevation of 2.5%	2040	1440	1020	720	510	360	7.07
Minimum R* with Superelevation of 3.5%	1440	1020	720	510	360	255	10
Desirable Minimum R* with Superelevation of 5%	1020	720	510	360	255	180	14.14
One Step below Desirable Minimum R with Superelevation of 7%	720	510	360	255	180	127	20
Two Steps below Desirable Minimum Radius with Superelevation of 7%	510	360	255	180	127	90	28.28
VERTICAL CURVATURE							
Desirable Minimum* Crest K Value	182	100	55	30	17	10	
One Step below Desirable Min Crest K Value	100	55	30	17	10	6.5	
Absolute Minimum Sag K Value	37	26	20	20	13	9	
OVERTAKING SIGHT DISTANCES							
Full Overtaking Sight Distance FOSD m.	*	580	490	410	345	290	
FOSD Overtaking Crest K Value	*	400	285	200	142	100	

Table 3

* Not recommended for use in the design of single carriageways (see Paragraphs 7.25 to 7.31 inclusive)

The V²/R values shown in Table 3 above simply represent a convenient means of identifying the relative levels of design parameters, irrespective of Design Speed.

motorways	band A	2 step
motorways	band B	3 steps
all-purpose	band A	3 steps
all-purpose	band B	4 steps

Figura 4 Normativa inglese, R in funzione della velocità di progetto.

A titolo esemplificativo, nel caso di un tracciato caratterizzato da una velocità di progetto di categoria 100A (100 km/h, classe funzionale “A”), il raggio desiderabile è pari a 720 m, assumendo un valore del 5% di pendenza trasversale, *superelevation*); è permesso, tuttavia, declassare il raggio minimo della curva di 3 classi (si ipotizza che la strada sia del tipo *all purpose, band A*), utilizzandone uno di 255 m, che rappresenta anche il raggio desiderabile corrispondente ad una velocità di progetto di 60 km/h. In situazioni di particolare difficoltà, non risolvibili nel modo descritto, è possibile scendere ulteriormente al di sotto dei valori minimi, previa approvazione da parte dell’ente preposto alla valutazione del progetto.

Il criterio che motiva la procedura operativa descritta è quello di mirare a far coincidere la velocità di progetto del tracciato con la velocità alla quale esso verrà realmente percorso, cioè la velocità operativa; in quest’ottica, ai fini della verifica della congruenza non sono previste relazioni tra i singoli tronchi che si susseguono lungo la strada. Quest’assenza può risultare critica solo nelle zone di passaggio tra tronchi aventi differenti caratteristiche e, quindi, velocità di progetto; in questo caso, la normativa si limita a precisare che la zona di transizione non deve presentare brusche variazioni nelle caratteristiche del progetto, mentre il solo tratto di strada con la velocità di progetto più bassa non deve possedere caratteristiche con valori inferiori a quelli desiderabili.

In seguito ai risultati ottenuti da alcuni studi condotti in *Australia* e volti ad investigare le relazioni tra la velocità di percorrenza delle curve orizzontali e le loro caratteristiche geometriche, è stata pubblicata, nel 1997, l’edizione della normativa attualmente in vigore; essa prevede un processo iterativo di verifica della compatibilità tra gli elementi geometrici del tracciato.

Il procedimento prevede l’elaborazione di un tracciato di primo tentativo e, successivamente, in funzione dell’ambiente attraversato e dell’intervallo entro cui sono contenuti i raggi delle curve, l’identificazione della velocità ambientale, ovvero dell’85° percentile delle velocità dei veicoli isolati previste sul più lungo rettilineo o curva con maggiore raggio; questa velocità, secondo la normativa australiana, rappresenta la “velocità desiderata” degli utenti sul tratto di strada in oggetto. La velocità ambientale è, quindi, propria di un tracciato caratterizzato da una geometria omogenea e da una situazione ambientale uniforme. Se i parametri di valutazione caratteristici cambiano, la strada deve essere suddivisa in più tronchi omogenei, ciascuno caratterizzato da una propria velocità ambientale. Relativamente a un tratto omogeneo, se la velocità ambientale non è raggiunta in alcun suo punto si stabilisce che esso non si adatta all’ambiente circostante; quando la velocità ambientale è, invece, congruente con l’ambiente attraversato, è possibile ricavare, attraverso il diagramma, la velocità di progetto delle singole curve, pari all’85° percentile delle velocità reali, in funzione della

velocità ambientale e del raggio di curvatura. Con la velocità di progetto si imposta, poi, la verifica di stabilità del veicolo in curva, assegnate l'aderenza e la pendenza trasversale.

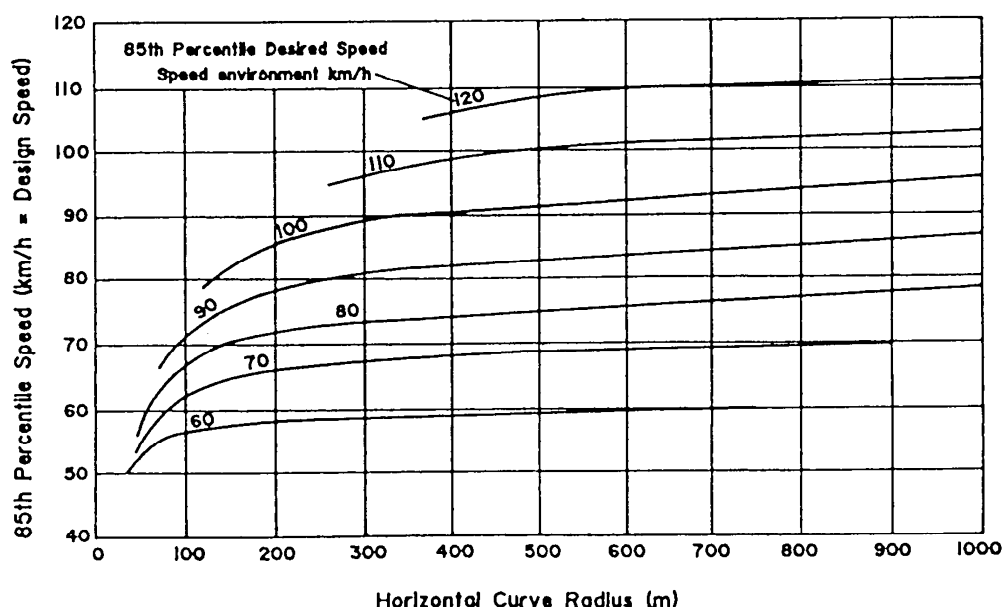


Figura 5 Normativa australiana, determinazione della velocità di progetto.

Ai fini della verifica della congruenza, la normativa australiana introduce un processo di tipo iterativo; in particolare, dopo aver ricavato con le modalità descritte in precedenza le velocità di progetto relative a tutti gli elementi planimetrici, è necessario verificare che, per entrambi i sensi di marcia, tra due elementi successivi la differenza massima tra le velocità sia pari a 10 km/h; nel caso che tale limite non venga rispettato, il tracciato deve essere modificato, ed il procedimento di verifica ripetuto, previa ricalcolo della velocità ambientale e, di conseguenza, delle velocità di progetto.

Le norme svizzere da più di trenta anni hanno introdotto, per le strade extraurbane, procedure di verifica della congruenza dei tracciati basate sul controllo del profilo delle velocità. La procedura originale considerava, ai fini della stima dell'andamento delle velocità lungo il tracciato, sia l'effetto dell'andamento planimetrico che quello della pendenza longitudinale delle livellette; ricerche successive hanno mostrato l'ininfluenza, sulle velocità delle autovetture, della pendenza longitudinale quando quest'ultima non supera valori del 7%, per cui nella revisione delle norme attualmente in vigore l'andamento delle velocità viene stimato unicamente in funzione delle caratteristiche planimetriche dell'asse. La relazione tra il raggio di curvatura e la velocità di progetto adottata dall'attuale normativa associa ai valori della velocità di progetto, compresi tra 40

km/h e 120 km/h, il raggio di curvatura corrispondente. Questa relazione è stata ottenuta da misure delle reali velocità dei veicoli e non è mai stata aggiornata, nonostante altri rilievi più recenti abbiano evidenziato che le velocità di percorrenza delle curve, in particolare di quelle caratterizzate da piccoli raggi di curvatura, siano notevolmente aumentate nel corso degli anni in relazione agli sviluppi motoristici dei veicoli stradali.

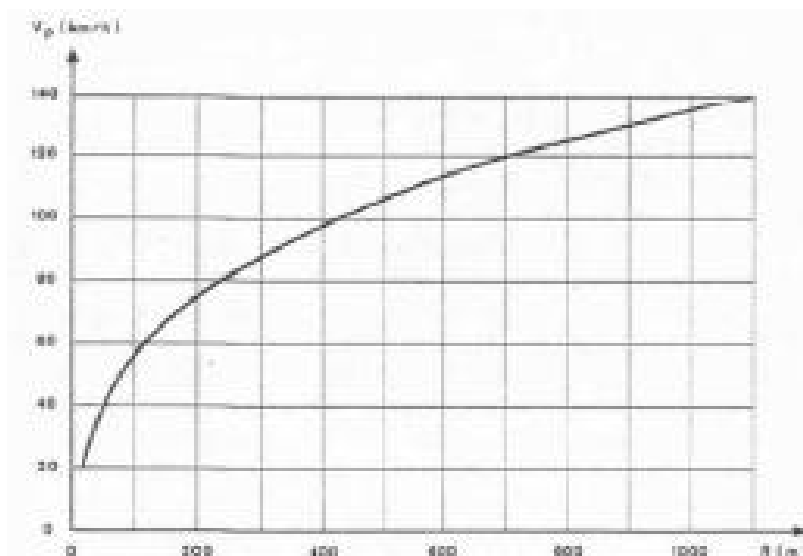


Figura 6 Normativa svizzera, velocità rilevata in funzione del R.

Per assicurare che il guidatore percepisca correttamente l'elemento curvilineo, la normativa svizzera fissa lo sviluppo minimo che deve avere l'arco di cerchio in funzione della velocità di progetto. Questa lunghezza corrisponde ad un tempo di percorrenza e ad un angolo di deviazione elevati, che variano da 2,25 secondi e $31,85^\circ$, per l'arco percorso a 25 km/h, a 6,90 secondi e $20,27^\circ$ per l'arco percorso a 120 km/h. Inoltre, la normativa svizzera prevede, per le sole strade extraurbane, la costruzione del diagramma di velocità per verificare la congruenza, quando il limite di velocità è superiore a 50 km/h. Il limite inferiore della velocità di progetto è rappresentato dalla velocità di base che deve essere scelta in un intervallo che dipende dal tipo di strada. Il limite superiore corrisponde al limite di velocità imposto sulla strada, anche se la velocità di progetto di alcuni elementi è superiore ad esso. La decelerazione e l'accelerazione sono ipotizzate costanti, entrambe pari a $0,8 \text{ m/s}^2$, e con tali valori deve essere calcolata la distanza di transizione tra due elementi caratterizzati da diverse velocità di progetto; in particolare, si ipotizza che l'accelerazione, in uscita dalla curva, inizi immediatamente dopo il punto di tangenza tra la curva e il rettilineo o l'eventuale curva di raccordo a raggio variabile, mentre la decelerazione, in ingresso alla curva, inizi a sufficiente distanza dalla curva stessa, in modo da rispettare, nel punto di tangenza, la

velocità prevista per la curva. Tale distanza di transizione, pertanto, deve essere sempre inferiore alla distanza di visibilità disponibile tra i due elementi, che a sua volta deve essere sempre inferiore alla distanza di percezione, fissata dalla normativa pari alla distanza percorsa in 12 secondi alla velocità di progetto. La differenza ammessa tra le velocità di progetto di due curve che si susseguono lungo il tracciato dipende dal tipo di strada; per le strade ad unica carreggiata a due corsie, tale limite massimo è pari a 20 km/h, anche se è preferibile contenerlo entro i 10 km/h. Nel caso la transizione riguardi una curva caratterizzata da una velocità di progetto inferiore a 80 km/h, con un rettilineo o una curva di raggio superiore a 420 m, tale differenza va limitata a 5 km/h.

La FHWA (*Federal Highway Administration*) nei primi anni 90 ha avviato un progetto, non ancora concluso, per lo sviluppo del pacchetto software denominato IHSDM (*Interactive Highway Safety Design Model*), che comprende vari moduli, ognuno dei quali permette l'analisi del tracciato di progetto in uno specifico settore della sicurezza. Uno di questi moduli serve alla valutazione della congruenza delle strade ad unica carreggiata a doppio senso di marcia. La metodologia che è stata ritenuta più adatta ad effettuare tale valutazione è la stima della velocità operativa lungo il tracciato, ovvero la costruzione del diagramma di velocità V_{85} , e la sua successiva analisi.

Una prima parte della ricerca è stata pubblicata nel 1994, mentre i risultati definitivi sono stati pubblicati nel 2000. Il modello per la valutazione della velocità operativa considera non solo l'andamento planimetrico del tracciato, utilizzando quale variabile indipendente nelle relazioni sviluppate il solo raggio di curvatura, ma anche l'andamento altimetrico, con la pendenza longitudinale, il raggio dei raccordi verticali e la distanza di visibilità disponibile. E' stato, inoltre, introdotto il concetto di "velocità desiderata", definita come la velocità che l'utente raggiunge in rettilineo quando non è limitato dalle condizioni delle caratteristiche geometriche e dal traffico, e fissata, per le strade ad unica carreggiata a doppio senso di marcia, pari a 100 km/h.

La procedura per la costruzione del diagramma prevede il confronto della distanza disponibile tra due curve successive con la lunghezza necessaria ad accelerare dalla velocità calcolata sulla prima curva alla "velocità desiderata", e quindi per decelerare da questa alla velocità della seconda curva. Se la distanza disponibile è superiore, allora la "velocità desiderata" è raggiunta e mantenuta, mentre in caso contrario, a seconda che la velocità della prima curva sia superiore o inferiore a quella della seconda curva si ha un andamento diverso: se la velocità della prima è inferiore a quella della seconda, allora il modello prevede che l'utente acceleri in uscita di curva e quindi decelererà per entrare nella curva successiva; se la velocità della prima curva è superiore a quella della seconda, il modello prevede una variazione lineare tra le due, senza la possibilità di raggiungere valori di

velocità superiori a quello della seconda. I valori proposti per la decelerazione e l'accelerazione sono funzione del raggio di curvatura e delle caratteristiche del profilo longitudinale. Una volta determinato il diagramma delle velocità, il modello valuta la congruenza in funzione dei valori di accelerazione e decelerazione e della differenza di velocità tra gli elementi che si susseguono lungo il tracciato.

Per quanto riguarda l'*Italia*, la normativa di riferimento, che trae parecchi elementi dalle norme svizzere, prevede la costruzione di un diagramma delle velocità di progetto che si basa sulle seguenti ipotesi:

- in rettilineo e sulle curve con raggio elevato la velocità tende al limite superiore dell'intervallo di velocità di progetto relativo al tipo di strada considerato;
- le variazioni di velocità lungo il tracciato sono consentite nei rettilinei, nelle curve di transizione e nelle curve di ampio raggio con un valore di accelerazione e decelerazione assunto pari a $0,8 \text{ m/s}^2$;
- la velocità nelle curve è funzione del raggio di curvatura;
- si assume, inoltre, che le pendenze longitudinali non influenzino le velocità.

La verifica di congruenza viene eseguita valutando le differenze di velocità di progetto di due elementi contigui. Nei tratti caratterizzati dalla velocità di progetto massima, questa differenza deve risultare inferiore a 10 e 5 km/h, rispettivamente per strade con $V_{p, \max}$ superiori a 100 km/h e inferiori a 80 km/h; negli altri tratti, caratterizzati da velocità inferiori, la differenza di velocità di progetto tra due elementi successivi non deve mai superare i 20 km/h. Le norme italiane, impiegando come parametro di controllo la sola velocità di progetto, non forniscono indicazioni riguardo le verifiche legate alla conoscenza delle velocità operative, demandando alla sensibilità del progettista i criteri da adottare in proposito. È questo uno dei motivi per cui, allo stato attuale, nel nostro Paese manca una formulazione ufficialmente riconosciuta per la stima delle velocità operative V_{85} .

La nuova bozza di normativa per l'adeguamento delle strade esistenti (aprile 2006), nella sua più recente revisione disponibile, dimostra come anche in Italia l'attenzione dei legislatori si stia spostando sulla velocità operativa quale parametro più significativo per guidare la scelta degli interventi da realizzare per migliorare la qualità del servizio e la sicurezza delle infrastrutture esistenti. I punti chiave della bozza riguardano:

- la progettazione degli interventi di adeguamento secondo criteri che tengano conto tanto dei singoli elementi del tracciato, quanto delle caratteristiche dell'infrastruttura nel suo complesso;

- la verifica, al momento dell'approvazione del progetto preliminare, della congruenza dei dati di input assunti per la progettazione con gli obiettivi prestazionali definiti in fase di pianificazione;
- la verifica, con cadenza quinquennale, del conseguimento degli obiettivi posti alla base di ciascun intervento di adeguamento;
- la pianificazione, da parte degli Enti proprietari, di campagne di monitoraggio delle caratteristiche funzionali e di sicurezza dei tratti stradali adeguati, per verificare l'effettivo conseguimento dei risultati prestazionali individuati come obiettivo per gli interventi di adeguamento.

L'imposizione di programmi di monitoraggio periodici della rete stradale a carico degli Enti gestori, peraltro già prevista nel Nuovo Codice della Strada (art. 227), prefigura nuovi scenari nell'ambito degli interventi di controllo e riduzione dell'incidentalità. Sarà indispensabile per gli Enti dotarsi di strumenti idonei al rilevamento delle caratteristiche funzionali e di sicurezza delle strade, ma anche acquisire quel *know how* necessario alla preparazione delle campagne di monitoraggio, alla valutazione delle osservazioni sperimentali ed alla progettazione degli interventi.

Sul piano scientifico, diversi studiosi e gruppi di ricerca italiani si sono interessati all'argomento pervenendo a relazioni che legano la velocità operativa alle caratteristiche della strada, sulla scorta dei dati provenienti da campagne di indagini sperimentali più o meno estese. Di particolare interesse sono gli studi condotti dal gruppo di ricercatori dell'Università di Trieste nell'ambito del Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale IASPIS (Interazione Ambiente Sicurezza nel Progetto delle Infrastrutture Stradali), che hanno consentito la formalizzazione del MOST (*Model of Operating Speed Trieste*), per la previsione delle velocità operative. Rispetto alla sua prima edizione, il MOST si è andato evolvendo nel tempo così da consentire, ad oggi, la previsione della V_{85} lungo tutto il tracciato planimetrico. L'applicazione dei criteri di Lamm al profilo delle V_{85} costruito con questo modello, consentirebbe di effettuare delle verifiche di congruenza in fase progettuale, cioè su strade non direttamente rilevate nell'ambito territoriale triestino, ma simili per configurazioni geometriche e caratteristiche funzionali.

La procedura di specificazione, calibrazione e validazione dei modelli di previsione delle velocità operative è finalizzata alla messa a punto di paradigmi formali che simulino in maniera appropriata il fenomeno della distribuzione delle velocità praticate dagli utenti, in una sezione di un tracciato stradale o su una parte di esso.

Il metodo si fonda sull'osservazione preliminare del fenomeno reale, cioè sull'indagine delle velocità effettivamente praticate dall'utenza, per poi definire una forma funzionale del modello attraverso un processo inferenziale di regressione sui dati osservati.

Innumerevoli sono le ricerche e gli studi pubblicati sull'argomento, così come numerosi sono i modelli di previsione delle velocità operative, frutto di osservazioni sperimentali in varie parti del mondo, reperibili in letteratura. Oggetto di interesse dei ricercatori, sono soprattutto le strade a carreggiata unica a due corsie e a doppio senso di marcia (*two-lane rural roads*) che solitamente rappresentano un “peso” importante nella rete stradale di ciascuna nazione; inoltre esse costituiscono il teatro del maggior numero di incidenti gravi che avvengono annualmente.

Ognuno di questi modelli, pur fornendo importanti risultati di carattere generale e individuando una serie di variabili indipendenti adatte a correlare la geometria degli elementi con le velocità operative, non può essere considerato universalmente valido; il motivo è da ricercarsi nelle differenze, a volte sostanziali, tra una realtà nazionale e l'altra (e, a volte, anche tra diverse realtà locali all'interno dello stesso Paese) in termini di orografia del territorio attraversato, condizioni climatiche, parco veicolare, abitudini degli utenti.

Lo sforzo degli esperti è teso al superamento dei problemi che impediscono la definizione di un modello di previsione delle velocità operative sufficientemente esaustivo, con l'intento di giungere a formulazioni che possano correlare le velocità operative con le principali caratteristiche geometriche degli elementi stessi costituenti lo sviluppo del nastro stradale.

All'interno delle normative e dei regolamenti di vari Paesi nel mondo si riscontrano, accanto ai metodi di verifica della congruenza, diverse formulazioni delle equazioni di regressione usate per stimare la velocità operativa V_{85} , ottenute sulla base di ricerche effettuate in tempi e scenari diversi; non deve stupire, quindi, che anche i risultati ottenuti siano diversi, spesso sensibilmente.

Il continuo cambiamento delle abitudini di guida e delle prestazioni dei mezzi rende necessario il miglioramento di questo tipo di modelli, e la loro calibrazione sulla base di osservazioni sperimentali eseguite in tempi recenti, per renderli più aderenti alla realtà locale oggetto di analisi.

Un'analisi storica della letteratura prodotta in materia di modelli previsionali, evidenzia che il primo approccio allo studio di questo tipo di modelli era volto alla ricerca di una velocità rappresentativa del comportamento degli utenti su interi tronchi stradali, anche di notevole lunghezza, con caratteristiche geometriche simili.

Successivamente, l'individuazione di nuovi parametri adatti ad essere utilizzati come variabili indipendenti nella stima delle velocità operative ha portato gli studiosi a ricercare delle correlazioni

tra le velocità operative mantenute su singoli elementi di tracciato (rettifili, curve, raccordi) e le principali caratteristiche geometriche degli elementi stessi.

Allo stato attuale, i risultati migliori sembrano potersi ottenere considerando i due approcci al problema in maniera sinergica: come variabili indipendenti possono assumersi i vari parametri rappresentativi della geometria dei singoli elementi unitamente ad un parametro che tenga, invece, conto delle caratteristiche peculiari del tratto omogeneo cui gli elementi geometrici appartengono.

La descrizione dei principali modelli di velocità operativa, è ampiamente trattata in letteratura scientifica nazionale ed internazionale di settore. Rinviamo al capitolo successivo la creazione di un elenco dettagliato delle relazioni matematiche sperimentali, si vuole qui sottolineare come i diversi modelli siano stati costruiti in modo da interpretare il comportamento dei conducenti su ciascuno degli elementi geometrici costituenti il tracciato: ritroveremo, pertanto, dei modelli distinti per la *velocità ambientale* (V_{env}), *velocità operativa in curva* (V_{85C}) e per la *velocità operativa in rettilineo* (V_{85T}).

Inoltre, come si chiarirà in seguito, tutte le V_{85} possono dipendere oltre che dai parametri geometrici caratteristici del singolo elemento esaminato (lunghezza o sviluppo, raggio di curvatura, pendenza longitudinale e trasversale, sezione trasversale, ecc...), anche da altri relativi al tratto omogeneo di strada di cui l'elemento fa parte.

Tra questi, può risultare particolarmente interessante la *velocità ambientale* (*speed environment*), definita da alcuni autori come la “velocità desiderata” (*desired speed*), cioè quella adottata percorrendo gli elementi meno limitanti di un tronco stradale avente tortuosità media omogenea².

Seguendo quest'ultimo orientamento si sono ottenuti modelli maggiormente accurati, con coefficienti di determinazione della regressione sempre più elevati; quest'osservazione ha spinto lo scrivente ad approfondire il tema della dipendenza della V_{85} su un dato elemento dalla velocità ambientale (V_{amb}) ed alla formulazione di modelli siffatti.

Come è ampiamente descritto nel seguito del presente lavoro, la maggiore difficoltà che si trova nel fronteggiare queste problematiche, è da ricercarsi nell'individuazione di criteri di validità generale atti a suddividere il tracciato in tronchi omogenei (*homogeneous sections*), su ciascuno dei quali poter determinare la velocità ambientale. Tale ostacolo è il vero limite allo sviluppo dei modelli basati sulla velocità desiderata V_{amb} .

² Quando si parla di “velocità adottata dagli utenti”, si intende ovviamente la V_{85} , in quanto la velocità attuata in una sezione è da considerarsi sempre una variabile casuale.

Uno degli scopi di questo lavoro di ricerca è, quindi, quello di contribuire a superare tali limiti definendo dei modelli originali di previsione della velocità ambientale e delle velocità operative che abbiano una valenza più generale.

Da ultimo, occorre sottolineare che, mentre per la definizione del modello di velocità operativa in curva V_{85C} si sono attinte informazioni da una corposa ed avanzata letteratura scientifica di riferimento, nel caso dei modelli di velocità operativa in rettilineo V_{85T} e di velocità ambientale sul tronco omogeneo V_{amb} , invece, le formulazioni disponibili nella recente bibliografia sono meno numerose ed ancora in fase di perfezionamento.

La ricerca di grandezze atte ad essere assunte come variabili indipendenti, unitamente alla considerazione che ciascuna variabile dev'essere considerata come un numero aleatorio e quindi sarà caratterizzata da un certo livello di significatività (*p-level*), ha spinto gli studiosi ad elaborare correlazioni di tipo statistico tra le velocità operative mantenute sui singoli elementi stradali e le caratteristiche geometriche degli stessi. Si è giunti, in tal modo, alla definizione di modelli in grado di stimare la velocità operativa su ciascuno degli elementi costituenti il tracciato plano-altimetrico.

In questa sezione si intendono riportare le principali formulazioni di velocità operativa relative alle strade extraurbane a due corsie e doppio senso di marcia con accessi non controllati, ottenute in ambito nazionale ed internazionale, distinguendole per tipologia di elemento.

A tal proposito, occorre sottolineare che accanto ai consueti elementi del tracciato, di cui generalmente si fa menzione, quali curve, rettilinei ed elementi di raccordo (clotoidi), è stata qui introdotta la tipologia di elemento denominata “tronco omogeneo”.

Il *tronco omogeneo* può definirsi come quel tratto di strada caratterizzato da un andamento geometrico uniforme e da una situazione ambientale costante (topografia, clima, ecc...). La necessità di considerare un sottoinsieme del tracciato stradale è legata alla possibilità di definire una *velocità ambientale* caratteristica del tratto omogeneo, che è da interpretarsi come la massima velocità operativa che si può realizzare sul tronco stesso.

Studi recenti portano a ritenere che la velocità che il conducente adotta su un particolare elemento del tracciato stradale non dipenda soltanto dalle caratteristiche proprie di quell'elemento, ma anche dal condizionamento operato dalle caratteristiche complessive (geometria dell'asse e della sezione, visuali libere, ecc...) degli elementi di tracciato che lo precedono: queste ultime, trovano una buona rappresentazione nel parametro velocità ambientale V_{amb} .

Seguendo tale approccio, nasce l'esigenza di specificare e calibrare modelli sperimentali anche per la velocità ambientale sul tronco omogeneo.

Ai modelli predittivi della velocità operativa in curva V_{85C} e della velocità operativa in rettilineo V_{85T} , sono stati affiancati, quindi, anche quei modelli che consentono di stimare la velocità ambientale: quest'ultima può essere impiegata come variabile indipendente nella previsione delle stesse velocità operative in curva ed in rettilineo, in modo che tali elementi risentano in maniera più diretta del “fattore ambientale”.

Come ampiamente discusso in precedenza, la velocità ambientale è la massima velocità operativa rilevata sul più lungo rettilineo o sulla curva di più ampio raggio appartenenti ad uno stesso tronco omogeneo di strada. Essa assume il significato di *velocità desiderata*, ossia la velocità che i singoli utenti praticerebbero in assenza di condizionamenti dovuti al traffico ed alla geometria stradale, e la sua determinazione è vincolata all'individuazione di *tronchi omogenei* del tracciato stradale oggetto di osservazione.

Le ricerche condotte nell'ambito dell'interazione tra uomo e strada confermano che gli utenti scelgono la velocità da adottare lungo il tracciato stradale non solo in funzione delle informazioni visive di tipo immediato, ma anche in base alle precedenti esperienze che, come affermato da Lunenfeld e Alexander, possono essere di due tipi: esperienze avute nel lungo periodo (o “a priori”) e nel breve periodo (o “ad hoc”). In diversi studi è emerso che le esperienze “ad hoc”, e cioè il comportamento tenuto dall'utente negli elementi precedenti, giocano un ruolo fondamentale nella previsione della velocità operativa sugli elementi successivi.

In definitiva, la velocità che il conducente assume su un particolare elemento di un tratto stradale non dipende soltanto dalle caratteristiche geometriche di quest'ultimo, ma è influenzato fortemente anche dalle caratteristiche complessive degli elementi che lo precedono.

Sulla base di queste osservazioni alcuni autori hanno scelto di adottare la velocità ambientale come parametro per la valutazione del comportamento generalizzato dell'utente. Affinché tale velocità sia effettivamente rappresentativa, è necessario che il tracciato lungo il quale il conducente matura la sua “esperienza” sia il più possibile *omogeneo*, vale a dire che dev'essere caratterizzato da una configurazione geometrica (andamento planimetrico) e da un contesto ambientale (topografico e climatico) uniformi.

La stima della velocità ambientale è subordinata al riconoscimento di un *tronco “omogeneo”* di tracciato: dalle sue caratteristiche dipenderà, ovviamente, il massimo valore della velocità che gli utenti possono adottare nel percorrerlo.

La scelta dei tronchi omogenei nell'ambito di un tracciato stradale è un'operazione abbastanza complessa che presenta non pochi elementi di incertezza, che saranno ampiamente discussi nel seguito di questo lavoro di ricerca. Si intendono qui illustrare, invece, i principali criteri e metodi di valutazione della velocità ambientale rinvenuti nella letteratura scientifica nazionale ed internazionale.

Innanzitutto, bisogna osservare che la velocità ambientale si ritrova sempre come variabile esplicativa in modelli predittivi della velocità operativa. Alcuni ricercatori hanno implementato dei modelli di velocità operativa in curva che prevedono l'uso della cosiddetta *velocità di approccio o di avvicinamento* (*Approach Speed* - A_s) definita come quella velocità praticata dagli utenti sul rettilineo di approccio alla curva, dove i due elementi in questione devono appartenere ad uno stesso tratto omogeneo di strada.

Nel modello elaborato da Krammes et al. compare la velocità sul rettilineo di approccio alla curva ma non viene fornito un criterio oggettivo per la determinazione del suo valore, a meno di non effettuare misure dirette di velocità sul rettilineo stesso, cosa che, di fatto, vanificherebbe l'utilizzo del modello di previsione della velocità operativa in curva.

Il modello di Kerman, recepito dalla normativa inglese, utilizza i risultati della più estesa ricerca condotta in Gran Bretagna sulle relazioni intercorrenti tra le caratteristiche geometriche di una curva e la velocità con la quale essa è percorsa; curve aventi lo stesso raggio di curvatura vengono percorse a velocità B_s diverse, in funzione della velocità di avvicinamento A_s secondo la relazione:

$$B_s = A_s \cdot \left(1 - \frac{A_s^2}{400 \cdot R} \right)$$

In questa espressione A_s dipende da due variabili, caratteristiche del tratto di strada analizzato: la variabile A_C , che è funzione della curvatura media e delle distanze di visibilità disponibili, e la variabile L_C , che è funzione della sezione trasversale della strada e del numero di intersezioni e accessi presenti su di essa. La velocità di avvicinamento viene associata a tratti omogenei di lunghezza minima di 2 km; conseguenza di ciò è che la velocità di percorrenza delle curve appartenenti ad uno stesso tracciato dipende dalla velocità di avvicinamento A_s , che è associata a ciascun tratto di caratteristiche omogenee, e rappresenta, quindi, una sorta di velocità ambientale.

La prima definizione di velocità ambientale si ritrova nei lavori di McLean, il quale sviluppa modelli di previsione delle velocità operative in curva in funzione del raggio della curva e della cosiddetta *Speed Environment*. Questa viene definita come il valore massimo fra le velocità operative misurate nei rettifili più lunghi o nelle curve di più ampio raggio, appartenenti ad un unico tratto omogeneo; può essere considerata la velocità con la quale i guidatori scelgono di percorrere un tratto di strada in condizioni di flusso libero, quando non sono condizionati dalle caratteristiche geometriche del tracciato. I risultati di questi studi sono stati recepiti dalla normativa australiana attualmente in vigore. Il valore della velocità ambientale è determinato in funzione del tipo di ambiente attraversato (pianeggiante, ondulato, collinare, montagnoso) e del raggio approssimativo delle curve contenute in tale tratto: sono queste le variabili in funzione delle quali si individuano i tratti omogenei.

Sull'esempio delle esperienze di McLean si sono mossi i ricercatori dell'Università di Trieste, i quali, oltre ai modelli di previsione della velocità operativa in curva V_{85C} ed in rettilineo V_{85T} citati nel seguito dallo scrivente, hanno formulato anche una relazione per la valutazione della velocità ambientale. L'espressione proposta è la seguente:

$$V_{des} = 123,54 - 2,79 \cdot CCR^{-0,47} \quad (\rho^2 = 0,76)$$

dove CCR [gon/km] è il *tasso di variazione della curvatura medio* (*Curvature Change Rate*) del tronco omogeneo stradale, definito come il rapporto tra la deviazione angolare totale cumulata lungo il tratto considerato (somma dei valori assoluti delle singole variazioni γ_i) e la sua lunghezza complessiva L :

$$CCR = \frac{\sum_i |\gamma_i|}{L}$$

Questo modello è stato determinato attraverso una regressione effettuata sui dati relativi a 23 tratti stradali omogenei della provincia di Trieste, ad andamento prevalentemente pianeggiante (i valori delle pendenze longitudinali non eccedono il 4%), aventi CCR variabili nell'intervallo 2÷434 gon/km e velocità ambientali rilevate comprese tra 68 e 129,5 km/h.

Adottando un criterio di scelta dei tratti omogenei analogo a quello seguito dai ricercatori dell'Università di Trieste, cioè basato sulla valutazione del CCR medio del tronco omogeneo, nel corso di questi anni si è pervenuto alla seguente espressione:

$$V_{amb} = 82,84 - 0,1033 \cdot CCR + 3,44 \cdot L_c \quad (\rho^2 = 0,84)$$

Dove il CCR è quello del tronco omogeneo così come definito in precedenza, mentre L_c è la larghezza della corsia [m].

L'introduzione di questi modelli ha prodotto un netto miglioramento delle possibilità di previsione delle velocità operative in curva ed in rettilineo; occorre, però, affrontare il problema della suddivisione della strada in tronchi omogenei per poter attribuire a ciascuno di questi una appropriata velocità ambientale, poiché quest'ultima dipende dalle caratteristiche complessive del tratto di strada omogeneo in cui la curva o il rettilineo sono inseriti.

Uno degli scopi precisi del presente lavoro è quello di fornire dei criteri oggettivi per la suddivisione del tracciato in tratti omogenei, per poi stabilire delle relazioni statisticamente significative tra i parametri "ambientali" che caratterizzano tali tronchi e la massima velocità che è possibile praticare su di essi.

I modelli proposti per le curve circolari (*curves*) utilizzano essenzialmente due tipi di variabili: quelle proprie dell'elemento considerato e quelle che fanno riferimento a parametri che considerano le caratteristiche degli elementi adiacenti o del tracciato nel suo complesso.

I parametri legati alla geometria della curva più comunemente utilizzati sono:

- il raggio, R [m];
- la curvatura, $C = 1/R$ [m^{-1}];
- il *tasso di variazione della curvatura*, CCR (*Curvature Change Rate*) [gon/km], che rappresenta il rapporto tra la deviazione angolare totale tra le tangenti alla curva nei punti iniziale e finale (in *gon*, cioè gradi centesimali) e la lunghezza complessiva del tratto

curvilineo: $CCR_s = \frac{200}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{L_2}{R} + \frac{L_1 + L_3}{2R} \right)}{L}$; si è utilizzato l'acronimo CCR_s per distinguere il

tasso di variazione della curvatura della singola curva (single curve pedice s) dal CCR medio di un tronco omogeneo, rapporto tra la deviazione angolare cumulata e la lunghezza del tratto considerato;

- il *grado di curvatura*, DC (*Degree of Curvature*) [$^\circ/100$ m], che fornisce una misura indiretta della deviazione angolare, rappresentando l'angolo al centro che sottende un arco avente sviluppo pari a 100 m ed appartenente ad una circonferenza di raggio R : $DC = \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{100}{R}$; con riferimento al solo tratto di curva circolare (trascurando la presenza delle curve di transizione),

è possibile passare dal DC al CCR_s tramite un fattore di conversione, ossia vale la relazione:

$$CCR_s = \frac{200}{180 \cdot 10^{-1}} \cdot CD = 11,11 \cdot CD.$$

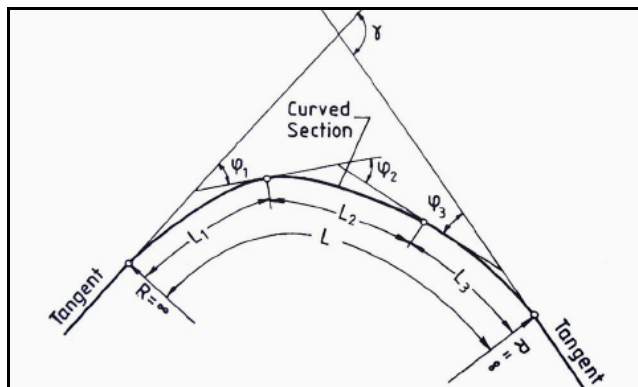


Figura 7 I parametri per il calcolo del CCR_s .

Non mancano però relazioni in cui compaiono anche altre variabili “locali”, quali: lo sviluppo della curva, la pendenza longitudinale e trasversale, la larghezza della sezione trasversale, ecc...

Il parametri che si possono considerare per rappresentare le caratteristiche degli elementi contigui sono il raggio (o, in alternativa, il DC o il CCR_s) della curva precedente, la lunghezza del rettilo che precede o la sua velocità di approccio. Per tenere in conto le qualità generali del tracciato si utilizza la velocità ambientale, così come definita in precedenza ed indicata talvolta come velocità desiderata (*desired speed*); alcuni autori hanno impiegato anche il limite di velocità imposto (*posted speed limit*) sulla strada.

Si riporta di seguito la Tabella 4 contenente numerosi modelli sviluppati in diversi Paesi, che derivano da regressioni effettuate su dati sperimentali ottenuti misurando le velocità delle autovetture su vari tipi di strade a due corsie, in condizioni di flusso libero e tracciati prevalentemente pianeggianti con pendenze longitudinali inferiori al 6%. Laddove disponibile, viene indicato anche il relativo coefficiente di determinazione (ρ^2).

Tabella 4 Modelli di Previsione delle Velocità Operative in Curva.

Autore	Paese	Modello	ρ^2
Taragin (1954)	USA	$V_{85} = 88,87 - 2554,76 / R$	0,86
McLean (1978)	Australia	$V_{85} = 101,2 - 1,56 \cdot DC = 101,2 - 0,043 \cdot CCR$	0,87
McLean (1979) <i>Austroads Rural Roads Design Guide (1997)</i>	Australia	$V_{85} = 53,80 + 0,464 \cdot V_{env} - 3260 / R + 85000 / R^2$	0,92
Kerman et al. (1982) <i>Design Standard TD 9/93</i>	Inghilterra	$V_{85} = V_a \cdot (1 - V_a^2 / (400 \cdot R))$	0,91
<i>Guidelines for the design of roads (RAS-L-1) (1984)</i>	Germania	$V_{85} = 60 + 39,70 \cdot \exp(-3,58 \cdot 10^{-3} \cdot CCR)$	0,79
Glennon et al. (1986)	USA	$V_{85} = 103,96 - (4524,94 / R)$	0,84
<i>SETRA (1986)</i>	Francia	$V_{85} = 102 / (1 + 346 \cdot (CCR / 63700)^{1,5})$	-
Lamm e Choueiri (1987)	USA	$V_{85} = 95,77 - 0,076 \cdot CCR$	0,84
Kanellaidis et al. (1990)	Grecia	$V_{85} = 32,20 + 0,839 \cdot V_d + 2226,9 / R - 533,6 / \sqrt{R}$	0,92
Lamm (1993) <i>ISE</i>	Germania	$V_{85} = 10^6 / (8270 + 8,01 \cdot CCR)$	0,73
Ottesen e Krammes (1994)	USA	$V_{85} = 103,04 - 0,0477 \cdot CCR$	0,80
<i>Morrall e Talarico (1994)</i>	Canada	$V_{85} = \exp(4,561 - 5,86 \cdot 10^{-3} \cdot DC)$	0,63
Islam e Seneviratne (1994)	USA	$V_{85} = 103,30 - 2,41 \cdot DC - 0,029 \cdot DC^2$	0,98
Krammes et al. (1995)	USA	$V_{85} = 41,62 - 1,29 \cdot DC + 0,0049 \cdot L_C - 0,21 \cdot DF + 0,95 \cdot V_a$	0,90
Lamm et al. (1995)	Grecia	$V_{85} = 10^6 / 10150,1 + 7,676 \cdot CCR$	0,81
Choueiri et al. (1995)	Libano	$V_{85} = 91,03 - 0,050 \cdot CCR$	0,81
Voigt (1996)	USA	$V_{85} = 99,61 - (2951,37 / R)$	0,84
Capaldo e Grossi (1998)	Italia	$V_{85} = (118 - 1,8 \cdot G_1) \cdot (1 - 0,543 \cdot CCR)$	-
Passetti e Fambro (1999)	USA	$V_{85} = 103,90 - (3020,50 / R)$	0,68
Fitzpatrick et al. (2000)	USA	$V_{85} = 106,30 - (3595,29 / R)$	0,92
Ottesen e Krammes (2000)	USA	$V_{85} = 102,44 - 1,57 \cdot DC - 0,012 \cdot LC - 0,01 \cdot DC \cdot LC$	0,81

Autore	Paese	Modello	ρ^2
Andueza (2000)	Venezuela	$V_{85} = 98,25 - 2795 / R - 894 / R_a + 7,486 \cdot DC + 9,308 \cdot L_T$	0,81
Marchionna et al. (2001) <i>Progetto IASPIs</i>	Italia	$V_{85} = 93,96 - 0,633 \cdot DC + 0,0026 \cdot DC^2$	0,86
Gibreel et al. (2001)	Canada	$V_{85} = 105,32 - 0,418 \cdot G_2 - 0,123 \cdot \sqrt{L_0}$	0,83
Jessen et al. (2001)	USA	$V_{85} = 86,80 + 0,297 \cdot V_p - 0,614 \cdot G_1 - 0,00239 \cdot ADT$	0,54
Donnell et al. (2001)	USA	$V_{85} = 74,5 + 0,0176 \cdot R - 1,69 \cdot G_2 - 0,00810 \cdot L_{T2}$	0,61
De Luca et al. (2002)	Italia	$V_{85} = 120 - 2,3 \cdot G_1 - 3512 / R$	0,79
Bella et al. (2004)	Italia	$V_{85} = -0,0297 \cdot CCR_S - 1,13 \cdot G_1 + 154$	0,83
Bevilacqua et al. (2004)	Italia	$V_{85} = 125,13 - 0,034 \cdot CCR_S - 1,253 \cdot G_1$	0,79
Crisman et al. (2005) <i>MOST</i>	Italia	$V_{85} = V_{amb} / (1 + 4,75 / R^{0,58})$ $V_{85} = 48,40 - 4995,00 / R + 163893,20 / R^2 + 0,60 \cdot V_{amb}$	0,88

Acronimi:

ADT = traffico giornaliero medio [veicoli/giorno];

CCR o CCR_S = tasso di variazione della curvatura della singola curva [°/km];

DC = grado di curvatura [°/100 m];

DF = angolo di deviazione [°];

 G_1 ; G_2 = pendenza longitudinale e trasversale, rispettivamente [%]; L_C ; L_T = sviluppo della curva e lunghezza del rettifilo, rispettivamente [m]; L_{T1} ; L_{T2} = lunghezza del rettifilo che precede e che segue, rispettivamente [m]; L_0 = distanza tra i punti d'intersezione orizzontale e verticale [m]; R = raggio della curva [m]; R_a = raggio della curva che precede [m]; V_a = velocità di approccio o di avvicinamento alla curva [km/h]; V_d = velocità desiderata [km/h]; V_{env} o V_{amb} = velocità ambientale [km/h]; V_p = limite di velocità legale o imposto dall'ente gestore [km/h]; V_T = velocità di approccio al rettifilo [km/h]; V_{85} = 85° percentile delle velocità [km/h].

Come si evince dalla precedente tabella, numerosi sono i modelli di previsione delle velocità operative nelle curve circolari in funzione delle sole caratteristiche geometriche della curva stessa. In particolare, si trova conferma di quanto affermato in precedenza riguardo il largo impiego delle variabili R , DC e CCR_S .

Di numero più limitato sono, invece, i modelli che prendono in considerazione anche una o più variabili legate alla geometria degli elementi contigui o del tracciato nel suo complesso. Detti modelli possono essere raggruppati, fondamentalmente, in tre classi: quelli che utilizzano le

caratteristiche geometriche della curva o del rettilineo precedenti (modelli di Andueza, Donnell); quelli che consigliano di valutare la velocità nel rettilineo di approccio alla curva (modelli di Kerman, Krammes); quelli che prevedono la definizione di una velocità ambientale dell'intero tronco (modelli di McLean, Kanellaidis, Crisman-Marchionna).

Gli ultimi due tipi di formulazioni presentano la complicazione di dover stimare la velocità di approccio alla curva oppure la velocità ambientale del tronco omogeneo cui la curva appartiene: di questo problema si parlerà più diffusamente nel seguito.

I rilevamenti condotti per il collezionamento dei dati sperimentali del presente lavoro di ricerca hanno portato all'acquisizione di un congruo numero di dati, sui quali sono state eseguite delle regressioni di tipo statistico volte a ricercare relazioni di dipendenza tra le velocità operative in curva e le caratteristiche geometriche degli elementi stessi.

Come si è detto già ampiamente in precedenza, uno degli approcci allo studio delle velocità operative si basa sul presupposto che l'esperienza acquisita da un conducente nel percorrere un tronco omogeneo di strada ("effetto memoria") influisca direttamente sulla velocità operata lungo un elemento del tracciato stesso: sposando questa teoria, si è rivolto l'interesse soprattutto verso quelle formulazioni che prevedevano l'uso della velocità ambientale.

Un primo modello di velocità operativa in curva sviluppato nel corso di questi anni è il seguente:

$$V_{85} = 36,85 - 2128,18 \cdot (1/R) + 40094,49 \cdot (1/R)^2 + 0,46 \cdot V_{amb} \quad (r^2 = 0,75)$$

esso è valido per strade extraurbane provinciali a due corsie site in pianura, con una tortuosità media dei tronchi omogenei variabile da 2,81 a 235 gon/km, raggi di curvatura compresi tra 30 e 5000 m, condizioni della pavimentazione mediocri e larghezza della corsia compresa tra i 2,5 e 5 m.

Infine, si può osservare che, mentre alcuni tra i modelli elencati in precedenza sono presenti all'interno di normative e regolamenti vigenti, in Italia manca una formulazione ufficiale, anche se molteplici sono i gruppi di ricerca che hanno affrontato il problema, proponendo delle relazioni dedotte dal trattamento di dati sperimentali. Nel seguito si citano alcuni fra i lavori rinvenuti da un'attenta analisi bibliografica.

Capaldo e Grossi del Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti "Luigi Tocchetti" dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, sperimentando su strade a due corsie con buone caratteristiche geometriche (carreggiate larghe non meno di 7,00 m, curve con raggi non inferiori a 200 m, rettili lunghi qualche centinaio di metri e pendenze longitudinali inferiori al 6%) hanno ottenuto:

$$V_{85} = (118 - 1,8 \cdot |i\%|) \cdot (1 - 0,543 \cdot CCR)$$

dove $i\%$ è la pendenza longitudinale del tratto che precede l'elemento considerato.

Sulla base dei *Safety Criteria* I and II di Lamm, Bella e Pintus hanno formulato su realtà virtuale una serie di modelli previsionali della velocità operativa V_{85} facendo uso di opportuni test, progettati nel rispetto delle “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”, che differiscono tra loro soltanto in relazione al profilo longitudinale. Tra i vari modelli, nel presente studio si cita il seguente, scelto in relazione all'elevato valore del coefficiente di regressione statistica e alla semplicità della forma adottata:

$$V_{85} = -0,0297 \cdot CCR_s - 1,13 \cdot i + 154 \quad (\rho^2 = 0,83)$$

Quest'ultima equazione mette in relazione la velocità operativa V_{85} solo con le condizioni plano-altimetriche locali, senza considerare anche quelle al contorno, cioè nei tratti immediatamente precedenti e/o susseguenti. Il modello mette in relazione la velocità operativa (*operating speed*) e la variazione altimetrica della linea d'asse stradale, che non sempre è presa in considerazione nei modelli rinvenuti in letteratura.

Altri studi che considerano contemporaneamente l'influenza dell'andamento planimetrico ed altimetrico del tracciato stradale sono quelli sviluppati dal gruppo di ricerca di Bevilacqua, Dimino e Nigrelli, i quali considerano strade a due corsie larghe 3,75 m, due banchine laterali di larghezza pari a 1,50 m, intervallo della velocità di progetto compreso tra 60÷100 km/h (strade comprese nella categoria C1 del vigente Decreto Ministeriale 5.11.2001), pendenza longitudinale inferiore al 4,8 %.

Gli stessi hanno messo a punto una ulteriore importante formulazione modellistica, che ha confermato il rapporto tra velocità operativa V_{85} e alcuni parametri geometrici come tasso di variazione della curvatura sulla singola curva CCR_s , tasso di variazione della curvatura CCR , pendenza del singolo elemento (i_s) e pendenza (i). Il primo e il terzo si riferiscono al tasso di variazione della curvatura e alla pendenza media studiata per ogni elemento, il secondo e il quarto sono calcolati per ciascun tratto di 1000 m che precede il sito osservato. A seguito dello studio dei dati ottenuti empiricamente è emersa una labile influenza sul valore della V_{85} della variazione di CCR e di i , mentre è stato possibile rilevare l'elevata dipendenza tra V_{85} e i singoli elementi planimetrici ed altimetrici della sezione di misura esaminata. La formulazione del modello risulta la seguente:

$$V_{85} = 125,13 - 0,034 \cdot CCR_s - 1,253 \cdot i_s \quad (\rho^2 = 0,79)$$

Un'espressione matematica per certi versi analoga alla precedente è quella ottenuta da De Luca, Grossi e Garofalo che hanno impostato la loro ricerca con l'obiettivo di trovare un legame tra comportamento umano e geometria del tracciato.

Sulla base della considerazione che la velocità attuata dall'utente è il risultato del compromesso tra velocità desiderata e livello di sicurezza percepito dall'ambiente stradale attraversato, hanno ottenuto la seguente espressione analitica:

$$V_{85} = 120 - 2,3|i| - 3512 \cdot (1/R) \quad (\rho^2 = 0,79)$$

Una particolare nota in materia merita il gruppo di ricercatori dell'Università di Trieste (Marchionna, Crisman, Perco, Fugaro, Roberti) che, partendo da uno studio compiuto nell'ambito del progetto IASPIS, ha delineato man mano un modello di velocità operativa in curva che tiene conto sia del raggio di curvatura della curva stessa, sia della velocità ambientale del tronco omogeneo percorso: ad esso si è fortemente ispirato, in fase di specificazione, il presente lavoro di ricerca analitica e sperimentale. In un recente rapporto sul tracciamento del diagramma delle velocità operative, gli stessi autori hanno aggiornato la precedente formulazione proponendo un modello in cui la velocità operativa in curva V_{85C} dipende sempre dalla curvatura dell'elemento geometrico di planimetria d'asse, ma ha un'espressione, o meglio, dei parametri che cambiano in base a prefissate classi di *CCR* medio del tronco omogeneo in cui l'elemento è inserito.

Prendendo in considerazione la velocità di progetto, la velocità operativa e il limite di velocità nell'ambito di un'indagine sperimentale eseguita su alcuni tronchi di strade extraurbane della Provincia di Torino, Bassani e Sant'Antagata, con le attività di raccolta dati e analisi dei valori di velocità operativa, hanno individuato i diagrammi di velocità e di visibilità che le norme prescrivono ai fini della valutazione della congruenza e della sicurezza intrinseca dei tracciati stradali italiani. Attraverso l'individuazione delle caratteristiche geometriche fondamentali dell'asse dell'infrastruttura viaria e le velocità operative rilevate, hanno inoltre formulato due modelli di previsione delle velocità per strade ad unica e doppia carreggiata.

Nel rilievo di un'antica strada di comunicazione tra Emilia Romagna e Toscana i ricercatori dell'Università di Bologna, hanno tarato modelli su strade caratterizzate da curve strette e tornanti con raggi compresi nell'intervallo 25-170 m, con pendenze longitudinali che variano dal 2% al 5% e punti singolari al 13% e 8%, utilizzando come parametro indipendente il grado di curvatura.

Per quanto riguarda i rettifili (*tangents*), le relazioni che legano le caratteristiche geometriche dell'elemento di tracciato stradale alla velocità operativa osservata sull'elemento stesso sono ottenute nella maggior parte dei modelli seguendo due approcci diversi. In un primo caso, sono mutate dalle relazioni ottenute per le curve circolari, estendendo all'infinito il dominio della variabile indipendente raggio di curvatura R (*radius of curvature*): operando in questo modo si ha il vantaggio di rendere continua la funzione velocità operativa dipendente dal raggio $V_{85}(R)$, facendo dipendere la velocità operativa in rettilineo dai soli parametri geometrici utilizzati anche per le curve, facilmente individuabili. Si perde però in accuratezza, dovendo utilizzare relazioni formulate specificamente per le curve e ottimizzate per esse. Seguendo un secondo orientamento, si formulano relazioni che correlano la velocità operativa in rettilineo con parametri geometrici come la lunghezza, nonché con altri fattori ambientali che possano influenzare la scelta della velocità tenuta dall'utente.

Prima però di rappresentare questi modelli, è necessario introdurre il concetto di *dipendenza* di un rettilineo dagli elementi circolari tra i quali esso è interposto ed operare una distinzione fra rettifili “dipendenti” o “corti” ed “indipendenti” o “lunghi”.

Considerando una successione di due curve intervallate da un rettilineo, quest'ultimo si può riguardare come una zona di transizione nella quale gli utenti adeguano la propria velocità e impostano la traiettoria per l'uscita e l'ingresso dalle curve. Detta a l'accelerazione (o decelerazione) in uscita (o ingresso) dalla curva, supposta costante, si definisce “distanza di transizione” (DT) la distanza necessaria ad adeguare la velocità dell'utente dal valore iniziale V_i a quello finale V_f . Nel caso di uscita dalla curva V_i rappresenta la velocità alla quale viene percorsa la curva (nella normativa italiana DM 5.11.2001 corrisponde al limite inferiore dell'intervallo di velocità di progetto), mentre V_f è la massima velocità raggiungibile in rettilineo (limite superiore V_p); vale il viceversa nel caso di ingresso in curva.

Considerando la prima ipotesi ed esprimendo le accelerazioni in m/s^2 , le velocità in km/h e le distanze in m , risulterà:

$$DT = \frac{V_f^2 - V_i^2}{3,6^2 \cdot 2 \cdot a}$$

Se il rettilineo è breve, esso non consente di portare a termine il cambio di velocità tra elemento curvo ed elemento rettilineo: si parlerà, in tal caso, di *rettilineo “dipendente” o “corto”*; al contrario,

se il rettifilo è sufficientemente lungo, su di esso può essere sviluppata tutta la variazione di velocità ed esso viene classificato come “*indipendente*” o “*lungo*” (vedi figura seguente).

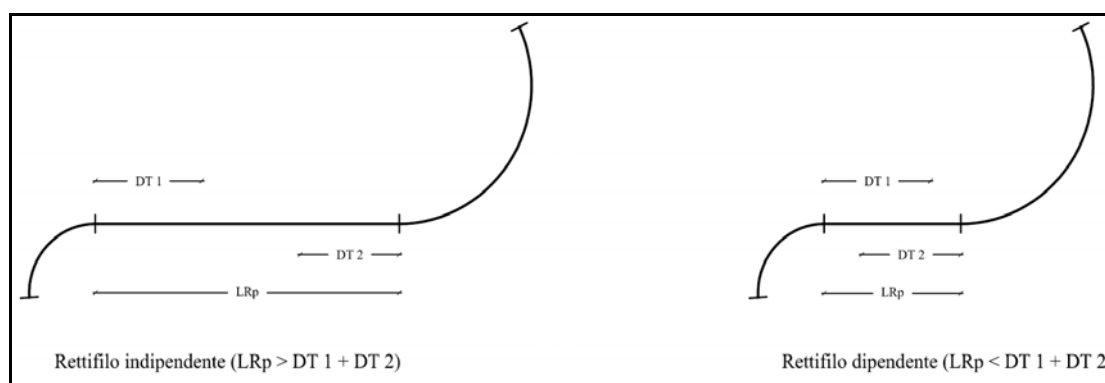


Figura 8 Dipendenza di rettifili interposti fra due curve successive.

La valutazione della dipendenza o indipendenza di un rettifilo andrebbe condotta con riferimento a ciascuna coppia di curve, calcolando le distanze di transizione sulla base delle velocità nelle curve (velocità di progetto oppure operative) e della velocità attuata in rettifilo (che può assumersi coincidente con la velocità desiderata o ambientale).

Tuttavia, per non inserire nei modelli un ulteriore elemento di complicazione, legato al calcolo delle distanze di transizione e quindi alla stima (tutt'altro che semplice!) delle accelerazioni e delle decelerazioni, si sceglie di considerare un “valore di soglia” per la lunghezza dei rettifili, al di sotto del quale vengono considerati *dipendenti*.

Nel caso di tracciati tortuosi o successioni di curve e controcurve con corti rettifili interposti (rettifili dipendenti), l'inserimento in curva avviene con decelerazioni contenute, in quanto la velocità è condizionata dalla tortuosità del tratto immediatamente precedente. In queste situazioni, le caratteristiche della prima curva influiscono sulla velocità con la quale viene percorsa quella successiva ed è possibile elaborare dei modelli predittivi in cui la velocità operativa in curva dipende anche dalla geometria della curva che precede (*preceding curve*).

Allo stesso modo, le velocità attuate su di un rettifilo dipendente sono condizionate dalle caratteristiche della curva immediatamente precedente, avendo il tratto rettilineo una lunghezza insufficiente allo sviluppo completo della velocità desiderata: i modelli di previsione della velocità operativa includeranno, dunque, variabili legate alla geometria dell'elemento planimetrico precedente (curva precedente).

Nel caso in cui il rettifilo sia indipendente, in condizioni di flusso ininterrotto ed in assenza di altri condizionamenti indotti dall'ambiente stradale, l'utente può attingere, almeno in linea teorica, la velocità desiderata.

A differenza del caso precedente gli elementi adiacenti al rettifilo non esercitano un'azione condizionante per cui, nel formulare modelli previsionali, non si terrà più conto delle loro caratteristiche geometriche attraverso appositi parametri, quanto piuttosto della geometria generale del tracciato e di altre grandezze geometriche proprie del rettifilo stesso.

Ad oggi, nella bibliografia internazionale i lavori sul tema sono piuttosto esigui se confrontati con la produzione scientifica riguardante la velocità operativa in curva V_{85C} , presumibilmente a causa del maggior numero di fattori che influiscono sulle velocità adottate in rettifilo (lunghezza dell'elemento geometrico, articolazione e dimensioni della sezione trasversale, andamento altimetrico del tracciato stradale, orografia del territorio attraversato, distanze di visibilità disponibili, ecc...); per di più, la dipendenza di tali parametri alle velocità in rettilineo è caratterizzato da una elevata variabilità e, quindi, è necessario disporre di una base di dati sperimentali ampia e complessa per conseguire risultati affidabili.

Ciò premesso, viene riportato nella tabella seguente un elenco contenente i principali modelli di previsione della velocità operativa in rettifilo rinvenuti nella letteratura scientifica di riferimento.

Essi sono stati ottenuti mediante regressioni sui dati di rilevamento relativi a strade a due corsie e doppio senso di marcia, in condizioni di flusso libero e con pendenze longitudinali al di sotto del 6%, e riguardano specificamente i rettifili dipendenti.

Tabella 5 Modelli di Previsione delle Velocità Operative in Rettifilo.

Autore	Paese	Modello	ρ^2
Cardoso (1995)	Portogallo	$V_{85T} = 41,67 - 548,892 / R_{Cp} + 0,0238 \cdot R_{Cp} + 0,0165 \cdot L_T - 0,0207 \cdot R_{Cs} + 5,95 \cdot L_c + 5,28 \cdot L_b$	0,90
Andueza (2000)	Venezuela	$V_{85T} = 100,69 - 3032 / R_{Cp} + 0,027819 \cdot L_T$	0,79
Crisman et al. (2004) <i>MOST</i>	Italia	$V_{85T} = -2,351 + 18,104 \cdot \log_{10}(L_T) + 0,585 \cdot V_{85Cp}$	0,88
Bella (2005)	Italia	$V_{85T} = -0,073 \cdot CCR_{S(i-1)} + 0,027 \cdot L_T - 1,61 \cdot i + 126,4$	0,88
Crisman et al. (2005) <i>MOST</i>	Italia	$V_{85T} = V_{85Cp} + 0,081 \cdot L_T^{0,75}$	0,67

Acronimi:

$CCR_{S(i-1)}$ = tasso di variazione della curvatura della singola curva che precede il rettilineo [$^{\circ}/km$];

i = pendenza longitudinale [%];

L_b = larghezza della banchina [m];

L_c = larghezza della corsia [m];

L_T = lunghezza del rettilineo [m];

R_{Cp} = raggio della curva che precede [m];

R_{Cs} = raggio della curva che segue [m];

V_{85Cp} = 85° percentile delle velocità della curva che precede [km/h];

V_{85T} = 85° percentile della velocità in rettilineo [km/h].

Si può constatare che i modelli indicati utilizzano sempre due tipi di variabili: quelle legate alle caratteristiche proprie del rettilineo considerato e quelle che rappresentano le proprietà geometriche degli elementi adiacenti, in particolare della curva precedente.

Cardoso ha eseguito varie ricerche relative alle correlazioni tra la velocità e le caratteristiche geometriche della strada, sviluppando modelli per la previsione della velocità operativa in rettilineo V_{85T} in differenti punti del tracciato planimetrico. La velocità operativa in rettilineo è espressa in funzione dei raggi delle curve precedente e successiva, delle larghezze della corsia e della banchina e della lunghezza dei rettilinei. Questo modello è stato ricavato su una base dati relativa a 37 rettilinei monitorati su una rete stradale di quasi 4000 km nel sud del Portogallo.

Andueza ha incentrato le sue ricerche sulla valutazione delle velocità su strade del Venezuela, operando in uno scenario totalmente differente da quello europeo. La velocità operativa in rettilineo risulta dipendere con un buon grado di correlazione dal raggio della curva che precede e dalla lunghezza del rettilineo stesso.

A differenza degli altri modelli predittivi Bella considera anche il valore della pendenza longitudinale del tratto in rettilineo percorso. Con l'uso di dati da simulatore di guida, il quale permette di definire le caratteristiche planimetriche, altimetriche e tipologiche del tracciato stradale in esame, sono stati raccolti dati relativi a strade extraurbane a due corsie ad unica carreggiata con larghezza delle corsie pari a 3,75 m, banchine di larghezza pari a 1,50 m e pendenza longitudinale fra -6% e +6%. Il modello ottenuto, pertanto, stima la velocità operativa in rettilineo sulla base del tasso di curvatura della curva precedente, lunghezza dell'elemento e pendenza longitudinale.

I ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Trieste lavorano da tempo sulle tematiche inerenti l'interazione tra l'uomo e l'ambiente stradale. Nell'ambito del Progetto nazionale IASPIS essi hanno sviluppato un modello di previsione denominato MOST (Model of Operating Speed Trieste). La versione del MOST proposta nel 2004 include alcune relazioni per la previsione delle velocità operative in rettilineo che risultano funzione della sua lunghezza L_T e della velocità operativa della curva precedente V_{85Cp} . Le curve con un raggio superiore a 2187 m nel modello proposto sono assimilate a rettifili per il calcolo della velocità operativa, inclusa la loro lunghezza in caso di rettifili adiacenti. Con successivi miglioramenti apportati al modello, viene cambiata l'espressione funzionale della velocità operativa in rettilineo V_{85T} (è prevista una funzione di tipo potenza anziché logaritmica della lunghezza), ma non cambiano le variabili dipendenti. Va detto, però, che in un lavoro proposto più di recente gli autori escludono il modello costruito per i rettifili dipendenti dal tracciamento del profilo delle velocità operative V_{85} , ritenendo che non vi sia sufficiente omogeneità tra i valori predetti su tali elementi e quelli previsti sulla curva precedente, mentre, al contrario, è molto più attendibile la stima della *velocità desiderata* sui lunghi rettifili.

Avvalendosi dei dati rilevati nel corso della campagna sperimentale di monitoraggio del traffico e rilievo delle velocità nell'anno 2006, si è potuto sviluppare un proprio modello previsionale della velocità operativa in rettilineo. Adottando nell'elaborazione dei dati un approccio analogo a quello seguito dal gruppo triestino ed individuando nella lunghezza del rettilineo L_T e nella

velocità operativa della curva che precede il rettifilo V_{85Cp} le due variabili più significative (p-level < 5%), si è pervenuto alla seguente formulazione:

$$V_{85T} = 15,446 \cdot \log_{10}(L_T) + 0,568 \cdot V_{85Cp} \quad (\rho^2 = 0,73)$$

essa si ritiene valida per strade provinciali extraurbane a due corsie con orografia poco ondulata ($i \ll 6\%$) con lunghezze variabili in un campo compreso fra 50 e 750 m, condizioni della pavimentazione mediocri e larghezza delle corsie, quasi ovunque senza banchine, compresa tra i 2,5 e 5,0 m e con una densità degli accessi inferiore a 6 per km.

5. ASPETTI METODOLOGICI

La complessità degli aspetti teorici e delle implicazioni pratiche nell'affrontare tali problematiche è tale da richiedere un'attenta e meticolosa programmazione dei lavori. Pur senza stabilire una rigida sequenza di operazioni, l'attività è stata svolta per stadi successivi e consequenziali, sicché è possibile distinguere tre fasi fondamentali della ricerca.

Nella *prima fase*, di approfondimento teorico ed indagine preliminare, sono stati considerati i seguenti aspetti:

- ✓ analisi della letteratura scientifica passata e recente, allo scopo di acquisire una conoscenza completa dell'evoluzione della ricerca negli anni e del suo stato attuale;
- ✓ esame dei risultati della campagna di monitoraggio 2003-2004 effettuata dalla Provincia di Salerno e formulazione di criteri di riclassificazione dei dati;
- ✓ selezione delle infrastrutture rilevanti ai fini della valutazione della velocità operativa, geometrizzazione della linea d'asse delle stesse ed identificazione dei tronchi omogenei per caratteristiche geometriche;
- ✓ progettazione delle successive campagne di rilevamento 2006 e 2007, mediante la scelta delle infrastrutture da monitorare e delle sezioni da rilevare su ciascuna di esse.

La *seconda fase* può identificarsi con il periodo della realizzazione pratica dell'indagine sperimentale, perciò comprende:

- ✓ esecuzione delle campagne di monitoraggio strumentale delle velocità attuate dai guidatori su strade secondarie extraurbane a carreggiata unica, a due corsie e doppio senso di marcia;
- ✓ acquisizione, interpretazione e gestione dei dati rilevati nelle specifiche e diverse condizioni al contorno.

Tutte le informazioni ottenute e le eventuali valutazioni espresse nel corso delle prime due fasi, siano esse di carattere qualitativo o quantitativo, sono confluite infine nella *terza fase*, che rappresenta il momento più delicato ed oneroso in termini computazionali, ossia dell'elaborazione analitica e della formalizzazione teorico-matematica dei risultati dedotti. Pertanto, in questa fase sono stati affrontati i seguenti studi:

- ✓ *screening* dei dati e creazione dell'archivio informatico di riferimento;
- ✓ elaborazione dei dati su basi statistiche ed individuazione dei parametri maggiormente significativi da cui dipende la velocità operativa V_{85} (questa operazione è stata eseguita distintamente per ciascuna tipologia di elementi geometrici componenti il tracciato planimetrico: tronchi omogenei, curve e rettifili);
- ✓ formulazione di modelli previsionali della velocità operativa in grado di predire con la maggiore affidabilità possibile il reale valore attuato;
- ✓ controllo della “coerenza” tra i singoli modelli e creazione di un unico modello previsionale della velocità operativa V_{85} , da utilizzare per la verifica della congruenza di un tracciato stradale;
- ✓ validazione dei modelli e della procedura di verifica innanzi definita, al fine di valutare la loro applicabilità nell'ambito progettuale.

Le tre fasi suesposte forniscono una rappresentazione schematica che aiuta a comprendere lo svolgimento dell'attività di ricerca, ma che assolutamente non dev'essere riguardata in maniera rigida e vincolante. Benché sia stata descritta la logica successione delle diverse operazioni, infatti, bisogna tener conto dell'elevato grado di sovrapposizione e di reciproca influenza che esse presentano. Così, ad esempio, la progettazione delle nuove campagne di rilevamento avviene contestualmente all'esecuzione di quelle già preventivamente progettate; i risultati di queste ultime, d'altra parte, possono modificare profondamente le conoscenze già acquisite ed i modelli sviluppati in precedenza; inoltre, un aggiornamento bibliografico costante è indispensabile se si vuole condurre una ricerca al passo coi tempi, che sia pronta a recepire i nuovi spunti e le indicazioni provenienti dagli studi più recenti.

Alla luce di queste considerazioni appare chiaro come la redazione del presente lavoro di ricerca matematico-sperimentale, nel rispetto degli obbiettivi prefissati, abbia riguardato quasi tutti gli aspetti previsti nelle varie fasi. A cominciare dall'integrazione della sezione bibliografica con nuovi riferimenti, costituiti per lo più dai testi di normative che già adottano tali standard per la progettazione stradale, o da articoli pubblicati sulle riviste specializzate di settore, o ancora da rapporti di ricerca presentati nel corso di simposi nazionali ed internazionali.

Contemporaneamente, sono state sottoposte ad una revisione geometrica tutte le infrastrutture rilevate. Questa operazione ha consentito di definire quelle grandezze degli elementi planimetrici (lunghezze dei rettifili, ampiezza delle curve, entità delle deviazioni angolari, ma anche posizionamento delle sezioni di rilevamento) che presentavano caratteri di incompletezza o di

ambiguità. Inoltre è stata dedicata un'attenzione particolare all'individuazione dei cosiddetti tronchi omogenei, con la proposta di alcuni criteri indicativi per il loro riconoscimento, nota la geometria d'asse.

I dati relativi alle nuove campagne di monitoraggio sono stati filtrati secondo una metodologia del tutto innovativa e di non semplice applicazione, ed uniti a quelli storicamente disponibili vanno a creare un ampio spettro di casistiche sperimentali. Più precisamente, essi sono stati aggregati in funzione dello specifico impiego previsto nella fase successiva, creando un unico *database strutturato* secondo le esigenze delle future elaborazioni.

Con il trattamento statistico-matematico dei dati sono stati affrontati i temi propri dell'ultima fase. L'approccio seguito si è basato spesso sull'implementazione di modelli di primo tentativo ispirati a quelli già presenti in letteratura da impiegare per l'analisi e la comprensione delle discordanze esistenti tra velocità previste e velocità effettivamente rilevate. Ciò ha permesso di individuare le deficienze imputabili sia ai modelli, sia alle variabili da prendere in considerazione, ma anche di scoprire particolari situazioni locali che rendevano i dati relativi a talune sezioni di rilevamento di non facile interpretazione per le successive elaborazioni numeriche.

Un rilevante elemento di novità è rappresentato dalle accennate verifiche di “congruenza” tra i modelli e dalla conseguente creazione di un'unica procedura per la previsione della velocità operativa V_{85} . Altrettanto significativa è la scelta di impiegare gli ultimi conteggi di traffico e rilievi di velocità, che hanno contribuito all'implementazione dei modelli finali, ottenendo in tal modo una casistica più ampia possibile.

Nei prossimi paragrafi verranno esaminati gli aspetti salienti della ricerca. La parte relativa alle sperimentazioni su strada, all'analisi ed alle regressioni sui dati ed infine alla formulazione di modelli predittivi.

6. INDAGINI SPERIMENTALI

L'azione di monitoraggio avviata dalla Provincia di Salerno fin dal 1999 anticipa l'emanazione di specifiche norme coattive, mira ad un livello di conoscenza delle criticità della rete stradale provinciale tale da realizzare dei precisi interventi per il miglioramento della sicurezza nella circolazione stradale. Alle finalità pratiche dell'Ente si è andato affiancando il lavoro di ricerca dello scrivente e, più specificamente, quello sviluppato nella presente tesi.

Infatti, se il rilevamento del traffico veicolare, unito ad una costante analisi dei dati sull'incidentalità, permette di definire gli interventi di adeguamento da attuare, nello stesso tempo esso consente la costruzione di una base di dati utilizzabile per lo studio e la calibrazione dei modelli teorico-sperimentali per prevedere il comportamento dei guidatori, sia sulle infrastrutture esistenti non direttamente monitorate, sia in fase di progettazione di nuove infrastrutture viarie.

Le osservazioni sperimentali rappresentano, insomma, un'occasione importante per poter affrontare lo studio delle infrastrutture stradali e risalire a modelli di previsione delle velocità operative attuate dagli utenti, sia pure in una realtà geograficamente circoscritta qual è il territorio provinciale salernitano.

Per l'esecuzione dei conteggi di traffico e dei rilievi di velocità, il Centro Provinciale per il Monitoraggio del fenomeno di incidentalità e dei fattori di rischio della Sicurezza Stradale della Provincia di Salerno (CPMSS) si è avvalso di apparecchiature conta-traffico tipo "KV Laser" di fabbricazione italiana della SODI Scientifica.

Il principio di funzionamento del conta-traffico è basato sull'emissione e la ricezione di una coppia di raggi laser diretti perpendicolarmente all'asse stradale; questi ultimi sono a bassa potenza emessa (classe 1) e quindi innocui per gli occupanti i veicoli; la velocità istantanea è desunta dall'intervallo temporale fra il passaggio del veicolo dalla prima alla seconda fotocellula. Il KV si compone del sistema di rilevamento laser, del software di scaricamento dei dati rilevati, di una batteria ricaricabile e di supporti per l'installazione. È stato installato prevalentemente su postazioni di tipo fisso (pali dell'illuminazione pubblica) o su un treppiedi sistemato esternamente alla carreggiata; laddove ciò non fosse possibile, è stato installato, mediante un apposito supporto vetro, in auto parcheggiate a margine della carreggiata o sulle banchine o sulle piazzole di sosta o in slarghi della sede stradale. I tecnici rilevatori hanno altresì inserito, ove consentito dalla localizzazione, lo strumento nel minibox metallico fornito oppure in un bidone da giardino, per

nasconderne la vista ai conducenti i quali, rilevando la presenza dell'apparecchiatura, avrebbero potuto alterare la loro velocità nell'attraversamento della sezione, falsando la relativa misurazione.

Lo strumento è dotato di una memoria non volatile, all'interno della quale vengono salvati i dati registrati; tutte le informazioni possono essere trasferite poi, con l'impiego del software dedicato, su Personal Computer attraverso un cavo seriale. Per ciascun passaggio veicolare sono stati registrati:

- istante [data, ora, minuti, secondi];
- velocità istantanea del veicolo [km/h];
- lunghezza del veicolo [m];
- direzione di marcia (variabile binaria, "dir 0" e "dir 1").



Figura 9 Strumentazione utilizzata per i rilevamenti.

La misurazione laser gestisce un notevole numero di passaggi e presenta un'elevata autonomia, ma non è, comunque, esente da errori di rilevazione, che possono verificarsi nei seguenti casi:

- quando si verificano passaggi troppo ravvicinati (meno di 0,5 secondi l'uno dall'altro), eventualità che si verifica prevalentemente quando veicoli aventi direzioni contrapposte si incrociano nella sezione di misurazione;
- quando l'asse della coppia di raggi laser è proiettato su superfici con basso coefficiente di rifrazione, oppure se gli assi dei veicoli non sono perfettamente perpendicolari all'asse delle carreggiate stradali.

Al verificarsi di tali errori di rilevazione, comunque, si è tenuto conto del passaggio veicolare (solo dato "qualitativo"), senza poter registrare la velocità e la lunghezza del veicolo interessato; tali errori, in generale, hanno inciso per un massimo del 10% sul totale dei veicoli transitati.

Per esplicitare le caratteristiche geometriche di ciascuna delle infrastrutture individuate nella fase precedente, occorre ricostruirne l'andamento planimetrico sulla base di un rilievo cartografico esistente (Cartografia Tecnica Regionale in scala originaria 1:5000) e successivamente isolare gli elementi di tracciato a curvatura costante, così da valutare per ciascuno di essi la tipologia (curve o rettili) e misurarne lo sviluppo, nonché l'angolo di deviazione, nel caso delle curve circolari. Quest'operazione va sotto il nome di geometrizzazione delle infrastrutture da rilevare.

Le difficoltà nella geometrizzazione nascono dal fatto che le strade in esame, di secondaria importanza nell'ambito della rete viaria provinciale, sono spesso nate senza un preciso progetto, ma da un progressivo adeguamento di arterie preesistenti a carattere locale e hanno subito negli anni una serie di interventi e rimaneggiamenti, cambiandone la tipologia e le caratteristiche funzionali, che ne hanno inficiato la regolarità geometrica, creando una serie di singolarità (curve policentriche, intersezioni a raso, ecc...).

La procedura utilizzata ha consentito di ricostruire, dal punto di vista grafico, l'andamento planimetrico delle strade da rilevare ossia la successione degli elementi che compongono ciascuna infrastruttura; per rendere più efficiente e rapido il processo ci si è avvalsi dell'uso del CAD e del software "Atlante 5 Premium", prodotto e commercializzato dalla "Leonardo SH".

Sul piano analitico, invece, sono stati realizzati dei fogli di calcolo in cui si indicano i dati relativi a ciascun elemento geometrico: tipologia, progressive di inizio e fine elemento, sviluppo, angolo di deviazione (in *gon*, cioè gradi centesimali [°]). Queste tabelle torneranno utili nella costruzione dei diagrammi della deviazione cumulata in funzione della progressiva, funzionali all'individuazione dei cosiddetti "tronchi omogenei".

Tabella 6 Esempio di Scheda di Rilievo in loco.

BATTIPAGLIA SP135 - "SPINETA"						
Sezione [n.]	Progressiva [m]	Interdistanze [m]	ELEMENTO	Carreggiata [m]	note	Data rilievo
1	0	0,00	CENTRO RETTIFILO	5,70	L=501m - 50KM/H	22/10/2007
2	100,00	100,00	APPROCCIO CURVA	5,70		22/10/2007
3	150,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,70		22/10/2007
4	200,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,73		22/10/2007
5	250,00	50,00	INIZIO CURVA	5,83		22/10/2007
6	275,00	25,00	CENTRO CURVA	6,00	R=150m	22/10/2007
7	300,00	25,00	FINE CURVA	5,81		23/10/2007
8	350,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,42		23/10/2007
9	400,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,42		23/10/2007
10	450,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,50		23/10/2007
11	539,00	89,00	CENTRO RETTIFILO	5,44	L=476m	23/10/2007
12	628,00	89,00	APPROCCIO CURVA	5,83		23/10/2007
13	678,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,70		29/10/2007
14	728,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,55		29/10/2007
15	763,00	35,00	INIZIO CURVA	5,82		29/10/2007
16	801,00	38,00	CENTRO CURVA	5,90	R=250m	29/10/2007
17	839,00	38,00	FINE CURVA	5,85		29/10/2007
18	889,00	50,00	APPROCCIO CURVA	6,06		29/10/2007
19	939,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,75		30/10/2007
20	989,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,77		30/10/2007
21	1196,00	207,00	CENTRO RETTIFILO	5,60	L=716m	30/10/2007
22	2538,00	1342,00	CURVA	5,87	50KM/H	30/10/2007
23	2624,00	86,00	RETTIFILO	5,65	50KM/H	30/10/2007
24	2713,00	89,00	CENTRO RETTIFILO	6,00		30/10/2007
25	3491,00	778,00	CENTRO RETTIFILO	5,55		05/11/2007
26	3601,00	110,00	APPROCCIO CURVA	5,52		05/11/2007
27	3651,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,73		05/11/2007
28	3701,00	50,00	APPROCCIO CURVA	6,06		06/11/2007
29	3751,00	50,00	INIZIO CURVA	5,68		06/11/2007
30	3795,00	44,00	CENTRO CURVA	6,10		06/11/2007
31	3879,00	84,00	FLESSO	6,40	50KM/H	07/11/2007
32	3953,00	74,00	CENTRO CURVA	8,00	R=220m	07/11/2007
33	3987,00	34,00	FINE CURVA	7,23		07/11/2007
34	4037,00	50,00	APPROCCIO CURVA	6,90		07/11/2007
35	4087,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,95	50KM/H	07/11/2007
36	4137,00	50,00	APPROCCIO CURVA	5,75		07/11/2007
37	4257,00	120,00	1° QUARTO RETTIFILO	6,10		08/11/2007
38	4527,00	270,00	CENTRO RETTIFILO	6,05	L=1080m	08/11/2007
39	4797,00	270,00	3° QUARTO RETTIFILO	5,75	segnale dosso	08/11/2007
40	4917,00	120,00	APPROCCIO CURVA	5,95		13/11/2007
41	4967,00	50,00	APPROCCIO CURVA	6,30		13/11/2007
42	5017,00	50,00	INIZIO CURVA	6,25		13/11/2007
43	5067,00	50,00	CENTRO CURVA	6,40	R=500m	13/11/2007
44	5120,00	53,00	FINE CURVA	6,18		13/11/2007
45	5173,00	53,00		6,28	segnale intersezione e divieto di sorpasso	13/11/2007
46	5223,00	50,00	APPROCCIO INTERSEZIONE	6,15		19/11/2007
47	5275,00	52,00	APPROCCIO INTERSEZIONE	6,33		19/11/2007
48	5363,00	88,00	APPROCCIO INTERSEZIONE	7,50	50KM/H (in entrambi i sensi di marcia)	19/11/2007
49	5483,00	120,00	1° QUARTO RETTIFILO	6,34		19/11/2007
50	5608,00	125,00	CENTRO RETTIFILO	6,13	L=490m	19/11/2007
51	5689,00	81,00	3° QUARTO RETTIFILO	9,10	50KM/H	19/11/2007

I criteri seguiti nella scelta delle sezioni di indagine su ciascuna delle infrastrutture individuate sono elencati sinteticamente qui di seguito:

- sezioni in corrispondenza del centro di ciascun elemento geometrico, cioè centro rettifili e centro curve;
- sezioni in corrispondenza della transizione rettifilo-curva;
- sezioni in prossimità delle transizioni rettifilo-curva, in numero di 3 per ciascuna transizione, distanti rispettivamente dalla sezione di transizione 30÷50 m, 80÷120 m e 140÷220 m: si è cercato di localizzare più vicino le sezioni più prossime alle transizioni rettifilo-curva per tenere conto del fatto che gli utenti mediamente non affrontano il cambio

di curvatura imposto dal tracciato con una decelerazione costante, ma tendono a concentrare l'azione frenante in prossimità della transizione stessa;

- sezioni in corrispondenza delle intersezioni a raso di maggiore significatività (escludendo, cioè, gli accessi a edifici isolati o zone industriali a scarsa urbanizzazione), in numero di 6 per ogni intersezione, 3 per ciascuna direzione, distanti dalla sezione centro dell'incrocio rispettivamente di 30÷50 m, 80÷120 m e 140÷220 m: anche in questo caso si è tenuto in considerazione il comportamento medio dell'utente in frenatura e accelerazione, per cui si è infittita la “griglia di rilevamento” in prossimità dell'elemento singolare;
- sezioni in corrispondenza delle zone urbanizzate (“portali di accesso”), in cui è lecito ipotizzare un cambiamento del comportamento dell'utenza a causa del mutamento degli stimoli ambientali nel passaggio da un contesto extraurbano ad uno maggiormente antropizzato;
- sezioni in corrispondenza di gallerie, in numero di 5 per ogni manufatto, 3 da un lato, distanti dall'ingresso rispettivamente di 30÷50 m, 80÷120 m e 140÷220 m e 2 dall'altro.

In questo contesto, vale la pena evidenziarne soltanto gli aspetti notevoli. Innanzitutto, le curve sono state considerate “percepibili come tali”, ai fini del comportamento del guidatore in termini di velocità, solo quando esse erano percorse dai veicoli in un tempo superiore ai 2,5 secondi. Considerando come velocità di approccio ad una curva, di raggio sufficientemente ampio, di un veicolo (proveniente, ad esempio, da un rettilineo lungo) quella corrispondente al limite legale, 90 km/h, si ricava che lo sviluppo minimo che la curva deve avere per poter essere percepita come tale è di circa 60 m; valori inferiori dello sviluppo minimo richiesto si sono ottenuti laddove il minore raggio delle curve suggeriva di ipotizzare velocità di percorrenza più basse. Per curve di piccolo sviluppo si è, quindi, evitato di pianificare rilevamenti in prossimità delle transizioni, e si è scelto di monitorare unicamente la zona contigua al centro dell'elemento. D'altro canto, per le curve di ampio raggio, in particolare per valori oltre i 5250 m per strade di tipo C, come indicato dal D.M. 5/11/2001, è possibile conservare la sagoma in contropendenza al valore 2,5 % e quindi in taluni casi si è trattata la curva come un rettilineo.

Il rilievo delle sezioni di approccio alle intersezioni è motivato dall'azione di condizionamento esterno che gli incroci possono esercitare sui conducenti, determinando lungo un itinerario extraurbano una riduzione delle velocità dei veicoli in avvicinamento all'incrocio stesso. In fase di progettazione della campagna di monitoraggio, si sono prese in considerazione le intersezioni a raso “isolate”, cioè non localizzate in prossimità di accessi o di altre intersezioni, e tali da influenzare le

condizioni cinematiche dei veicoli in avvicinamento per effetto della loro sola presenza. Per individuare la “distanza di estinzione” dell’effetto di perturbazione delle velocità praticate dovuto alla presenza dell’intersezione si è fatto riferimento ai risultati di recenti ricerche in ambito nazionale, quantificando questa distanza in circa 200 m dal centro dell’incrocio. Uno studio in proposito è stato realizzato, sulle strade oggetto di rilievo, portando a conclusioni non dissimili da quelle menzionate.

Il monitoraggio delle sezioni di approccio alle curve è stato effettuato con l’obiettivo di raccogliere dati per poter caratterizzare la variazione del comportamento degli utenti nel passaggio da un elemento ad uno avente diversa curvatura (in particolare da un rettilineo ad una curva e viceversa), registrando le velocità operate dagli utenti e valutando le accelerazioni e decelerazioni in entrata e uscita dalle curve stesse. Da recenti studi condotti in ambito nazionale ed internazionale supportati da estese indagini sperimentali su strade extraurbane a due corsie, è risultato che le zone di transizione che precedono una curva o la seguono, dove l’utente adegua la velocità, rispettivamente decelerando o accelerando, hanno lunghezze, misurate dai punti di tangenza tra rettilinei e curva, non superiori ai 120 m. La variazione di velocità, inoltre, non è quasi mai attuata con decelerazione o accelerazione costante, mentre i guidatori tendono a concentrare l’azione di frenatura nelle immediate vicinanze (30÷40 m) della zona di variazione della curvatura planimetrica dell’asse. Questo aspetto assume particolare rilevanza in strade che, come quelle oggetto del presente lavoro di ricerca, sono prive di raccordi di transizione a raggio variabile tra rettilinei e curve.

Le sezioni di approccio alle zone urbanizzate rivestono un interesse legato soprattutto all’incidentalità. Spesso gli utenti non modificano la condotta di guida passando dall’ambito extraurbano a quello urbano e ciò è fonte di un pericoloso aumento del rischio di incidenti. Caratterizzare il comportamento degli utenti che, percorrendo una strada extraurbana, si apprestano ad attraversare un ambiente urbanizzato in assenza di dispositivi di moderazione della velocità (*traffic calming devices*), può costituire un valido strumento per comprendere a quali obiettivi l’adozione di detti dispositivi deve mirare, in termini di modulazione delle velocità operative.

Infine, occorre sottolineare che tutti i principi illustrati hanno rappresentato le linee guida nella localizzazione delle sezioni da rilevare, in quanto questa fase decisionale è stata fortemente condizionata dalle singolarità presenti in ciascuna infrastruttura.

Per ogni sezione prescelta, si è provveduto a referenziarla individuandola sulla cartografia disponibile, numerandola in modo univoco e registrandone la corrispondente ascissa curvilinea (progressiva chilometrica), misurata da un punto di riferimento convenzionale localizzato sull’infrastruttura (“sezione 0”).

Il risultato di tutto l'iter progettuale descritto è ben evidenziato negli stralci cartografici. Inoltre, per consentire ai rilevatori una semplice individuazione delle sezioni stesse, sono state loro consegnate, dopo averle compilate per ciascuna strada analizzata, delle tabelle in cui erano riportate, per ogni sezione, l'ordinale identificativo (in corrispondenza di quello presente in cartografia), la progressiva (ascissa curvilinea a partire dalla "sezione 0"), la geometria dell'elemento corrispondente (rettifilo, curva, transizione), la distanza parziale con la sezione precedente e, in nota, il criterio motivante la scelta, tra quelli enumerati in precedenza. Un esempio di scheda di rilevamento è rappresentato in tabella seguente per la SP135.

Lavorando in questo modo è stato possibile ottenere un piano di sezionamento che non fosse rigidamente stabilito a priori, bensì adattabile a modifiche "in itinere", nell'eventualità di variazione del numero o della localizzazione delle sezioni da monitorare.

Tabella 7 Esempio di Scheda di Rilievo del Traffico Veicolare.

SCHEDA RILIEVO TRAFFICO VEICOLARE									
DATA	INTERVALLO ORARIO	ORARIO SUL KV LASER	DATA SUL LASER	KV	KV LASER N. seriale	N. SEZIONE CARTOGR.	NOME STRADA	DIR_0	DIR_1
22/10/2007	9,24-13,38	9,24-13,38	22/10/2007		3	1	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
22/10/2007	9,28-13,39	10,30-14,39	17/10/2007		2	2	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
22/10/2007	9,34-13,49	21,41-01,57	21/07/2007		1	3	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
22/10/2007	13,44-18,39	13,44-18,39	22/10/2007		3	4	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
22/10/2007	13,45-18,41	14,40-19,34	17/10/2007		2	5	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
22/10/2007	13,52-18,44	01,57-06,49	22/07/2007		1	6	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
23/10/2007	8,35-13,21	06,52-11,31	23/07/2007		1	7	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
23/10/2007	8,37-13,26	19,34-00,13	17/10/2007		2	8	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
23/10/2007	8,39-13,29	08,51-13,29	23/10/2007		3	9	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
23/10/2007	13,30-17,40	11,32-15,33	23/07/2007		1	10	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
23/10/2007	13,36-17,42	00,14-04,22	18/10/2007		2	11	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
23/10/2007	13,38-17,45	13,38-17,45	23/10/2007		3	12	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
29/10/2007	08,52-13,30	04,23-09,01	18/10/2007		2	13	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
29/10/2007	08,58-13,32	10,03-14,32	29/10/2007		3	14	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
29/10/2007	09,04-13,33	15,43-20,11	22/07/2007		1	15	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
29/10/2007	13,34-17,08	20,12-23,48	22/07/2007		1	16	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
29/10/2007	13,37-17,09	14,38-18,13	29/10/2007		3	17	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
29/10/2007	13,45-17,10	09,05-12,34	18/10/2007		2	18	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
30/10/2007	08,16-12,45	09,19-13,47	30/10/2007		3	19	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
30/10/2007	08,14-12,46	12,35-17,07	10/10/2007		2	20	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
30/10/2007	08,19-12,49	23,48-04,18	22/07/2007		1	21	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
30/10/2007	12,45-17,15	04,19-08,37	23/07/2007		1	22	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
30/10/2007	13,00-17,17	17,13-21,26	23/07/2007		2	23	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
30/10/2007	13,13-17,18	14,13-18,20	30/10/2007		3	24	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
05/11/2007	14,10-17,55	10,52-14,20	05/11/2007		1	25	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
05/11/2007	14,05-17,51	10,32-14,06	05/11/2007		2	26	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
05/11/2007	14,00-17,46	14,02-17,46	05/11/2007		3	27	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
06/11/2007	14,05-17,20	14,07-17,24	05/11/2007		2	28	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
06/11/2007	14,07-17,21	14,12-17,23	06/11/2007		3	29	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
06/11/2007	14,16-17,25	14,24-17,54	05/11/2007		1	30	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
07/11/2007	08,40-12,40	17,25-21,28	05/11/2007		2	31	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
07/11/2007	08,47-12,43	17,35-21,32	05/11/2007		1	32	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
07/11/2007	08,50-12,48	08,53-12,48	07/11/2007		3	33	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
07/11/2007	12,50-17,40	12,40-04,12	05/11/2007		1	34	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
07/11/2007	12,50-17,33	21,28-02,11	05/11/2007		2	35	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
07/11/2007	13,00-17,30	13,00-17,33	07/11/2007		3	36	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
08/11/2007	14,16-18,03	02,16-06,13	06/11/2007		2	37	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
08/11/2007	14,10-18,06	14,11-18,07	08/11/2007		3	38	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
08/11/2007	14,10-18,08	02,16-06,25	06/11/2007		1	39	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
13/11/2007	08,35-13,29	06,32-11,24	06/11/2007		1	40	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
13/11/2007	08,45-13,30	06,19-11,05	06/11/2007		2	41	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
13/11/2007	08,52-13,34	08,52-13,34	13/11/2007		3	42	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
13/11/2007	13,34-17,30	11,25-15,23	06/11/2007		1	43	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
13/11/2007	13,37-17,34	11,07-15,04	06/11/2007		2	44	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
13/11/2007	13,47-17,37	13,47-17,37	13/11/2007		3	45	SP135 - "Spineta"	Mare	Battipaglia
19/11/2007	09,04-13,08	09,04-13,08	19/11/2007		3	46	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
19/11/2007	09,06-13,10	15,28-19,30	06/11/2007		1	47	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
19/11/2007	09,11-13,12	15,08-19,08	06/11/2007		2	48	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
19/11/2007	13,34-16,12	13,34-16,12	19/11/2007		3	49	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
19/11/2007	13,19-16,15	19,07-22,06	07/11/2007		2	50	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare
19/11/2007	13,23-16,12	19,31-00,22	07/11/2007		1	51	SP135 - "Spineta"	Battipaglia	Mare

La campagna di monitoraggio 2006 prevedeva il rilievo di 520 sezioni da monitorare utilizzando, contemporaneamente su una stessa strada, due apparecchiature di misura per un tempo

di due ore e mezza su due sezioni, e poi spostando le apparecchiature sulle due sezioni successive, così da misurare 8 sezioni per ogni giornata di lavoro di ciascuna squadra di rilevatori. La scelta delle sezioni di indagine ha riguardato inizialmente le 8 strade individuate durante la fase preliminare, di cui 5 localizzate nella zona della Piana del Sele (S.P. 30B, S.P. 262, S.P. 204, S.P. 312 e S.P. 30A), e 3 nella zona del Vallo di Diano (S.P. 52, S.S. 19 ter, S.S. 426).

Dall'analisi dei dati dei conteggi del traffico, tuttavia, è risultato che sulla S.P. 30 A si realizzava un flusso veicolare superiore a 650 veic/ (h-corsia): situazione che, generando un condizionamento tra i veicoli, contrastava con l'ipotesi di flusso libero. Inoltre la S.S. 19 ter si è rivelata alquanto pericolosa per i rilevatori, i quali si trovarono nell'impossibilità di operare nelle necessarie condizioni di sicurezza. Queste considerazioni hanno spinto il CPMSS-SA ad abbandonare le campagne avviate su tali strade e ad individuare, di concerto con lo scrivente, un'infrastruttura il cui monitoraggio potesse risultare ugualmente utile: in tal modo è stata introdotta nella campagna di rilevamenti 2006 anche la S.S. 166. Un quadro riassuntivo delle sezioni monitorate nel corso dell'anno 2006, viene fornito nella seguente tabella.

Tabella 8 Piano di Sezionamento per l'anno 2006.

PIANA DEL SELE				VALLO DI DIANO			
Strada	Lunghezza [km]	N° sezioni previste	N°_sezioni rilevate	Strada	Lunghezza [km]	N°_sezioni previste	N°_sezioni rilevate
S.P. 30 b	6,189	43	43 ⁽¹⁾	S.P. 52	3,459	60	60
S.P. 30 a ⁽²⁾	9,762	137	81	S.S. 426	4,083	84	84
S.P. 204 ⁽³⁾	1,067	19	12	S.S. 19 ter ⁽⁴⁾	7,270	120	18
S.P. 262 ⁽³⁾	7,083	45	40 ⁽³⁾	S.S. 166 ⁽⁵⁾	5,337	99	99
S.P. 312	8,281	80	80	-	-	-	-
Totale sezioni		324	256	Totale sezioni		363	261
Totale sezioni utilizzate ⁽⁶⁾			160	Totale sezioni utilizzate ⁽⁶⁾			241

Alcune note:

- (1) I dati su cui si è operato si riferiscono alle prime 42 sezioni (sezione n.43 esclusa dalle elaborazioni);
- (2) Piano originario: 137 sezioni (2A÷18A; 1÷37; 55÷136). Rilevate: 81 sezioni (2A÷18A; 1÷37; 55÷80 – 6,4 km ca.). Dai primi conteggi è risultato un flusso veicolare troppo elevato ed i rilievi non vennero portati a termine;
- (3) Nell'originario piano di sezionamento la S.P. 204 e la S.P. 262 sono state considerate una la prosecuzione dell'altra, mentre in realtà tra le due provinciali è interposta la S.S. 18: in particolare il tratto di statale che le separa è quello su cui si inserirono le progressive 41÷45. Ovviamente tali sezioni sono state eliminate, perché impropriamente attribuite alla SP262. I conteggi relativi alle sezioni 39 e 40 della S.P. 262 ed alle 12 sezioni rilevate sulla S.P. 204 non sono stati impiegati nelle elaborazioni;
- (4) Piano di sezionamento originario: 120 sezioni rilevate: 18 sezioni (10÷27 - 1,3 km circa). Successivamente questa statale è stata esclusa perché troppo pericolosa per i rilevatori. I dati rilevati non sono stati impiegati nelle elaborazioni dei modelli di previsione;
- (5) I conteggi relativi alle sezioni 44 e 46 della S.S. 166 sono stati esclusi perché insufficienti;
- (6) Sezioni i cui conteggi sono stati effettivamente impiegati in fase di definizione e calibrazione dei modelli previsionali.

Come si può notare, sono state monitorate 517 sezioni (256 sulle strade della Piana del Sele e 261 su quelle del Vallo di Diano). Ma del totale delle sezioni rilevate soltanto 401 hanno dato un contributo effettivo alla ricerca, ossia hanno fornito dati che potevano essere impiegati nelle elaborazioni analitiche e per le regressioni statistiche.

Il successivo programma di Conteggi di Traffico e Rilievo delle Velocità anno 2007, terminato il 19 Novembre, si presenta notevolmente diverso dal precedente.

Il piano ha previsto il rilievo di 100 sezioni situate nel Vallo di Diano. Per ogni giornata lavorativa (12 ore dalle 8.00 alle 20.00) sono state monitorate cinque sezioni: una per 12 ore e quattro per 6 ore. Esso include rilievi su 2 strade statali (S.S. 103 e S.S. 598), che per caratteristiche geometriche e funzionali (tortuosità, pendenza longitudinale, controllo degli accessi, ecc...) si distinguono alquanto dalle infrastrutture analizzate in precedenza. Inoltre prevede il monitoraggio di 5 porte d'accesso (5 sezioni per porta) site a Polla (S.P. 125), Sant'Arsenio Nord (S.S. 426), Sant'Arsenio Sud (S.S. 426), Teggiano (S.P. 39) e Tardiano (S.S. 103), che sono state specificamente individuate per studiare il comportamento dei conducenti nel passaggio dalle tratte extraurbane alle aree urbanizzate. Un altro elemento di novità è rappresentato dal notevole incremento dei tempi di osservazione su ciascun sito. Naturalmente, ciò ha comportato una minore estensione del monitoraggio in termini sezioni rilevate rispetto all'annata precedente.

Il piano completo è sinteticamente descritto nella tabella seguente:

Tabella 9 Programma dei Rilievi per l'anno 2007a nel Vallo di Diano.

Strada	Località	Misure per:	N° sezioni	Codice sezioni, da_a
SP125	Polla_nord	porta d'accesso	5	1_5
SS426	S.Arsenio_nord	porta d'accesso	5	71_75
SS426	S.Arsenio_sud	porta d'accesso	5	6_10
SP39	Teggiano_nord	porta d'accesso	5	11_15
SS103	Tardiano	porta d'accesso	5	26_30
SS426_SS166	Sant'Arsenio - San Rufo - Atena Lucana - Teggiano	intersezione	10	16_25
SS598	Atena Lucana	strada	5	61_70
SS598	Brienza	galleria	5	
SS103	Tardiano	strada	25	31_60
SS103	Montesano sulla Marcellana	galleria	5	
SS103	Tardiano	strada	25	76_100
Totale sez.			100	1_100

Una seconda fase di Conteggi di Traffico e Rilievi di Velocità anno 2007 ha previsto il monitoraggio di un'arteria di penetrazione nel centro urbano di Salerno (Viadotto Gatto che collega l'autostrada A3 con il porto di Salerno – 3 sezioni monitorate per 4 giorni), una porta d'accesso già realizzata (sulla S.P. 25A in località Giffoni Sei Casali – 18 sezioni da 6 ore ognuna) e la strada S.P. 135 (sita nella Piane del Sele – 51 sezioni da 6 ore ognuna).

Tabella 10 Programma dei Rilievi per l'anno 2007b.

Strada	Località	Misure per:	N° sezioni	Codice sezioni, da_a
Viadotto Gatto	Salerno	Traffico pesante	12	1_3
SP25A	Giffoni Sei Casali	porta d'accesso realizzata	18	1_18
SP135	Battipaglia	strada	51	1_51
Totale sez.			81	



Figura 10 Sezioni di rilevamento sulla S.P. 135.

7. ELABORAZIONI DEI DATI

In una prima fase, si è dedotta una classificazione in quattro classi tipologiche, in base alla lunghezza L dei veicoli:

- Moto: $L \leq 3,0$ m;
- Autovetture: $3,0 \text{ m} < L \leq 6,0$ m;
- Trasporto leggero: $6,0 \text{ m} < L \leq 9,0$ m;
- Mezzi pesanti: $L > 9,0$ m.

I dati riguardanti i conteggi effettuati nel 2003 e nel 2004 sono stati organizzati in forma tabellare, in singoli fogli di calcolo, ciascuno riferito a una specifica sezione di conteggio.

Le apparecchiature di conteggio, come già detto precedentemente, registrano in una memoria interna una serie di informazioni riferite a ciascun veicolo conteggiato, per cui il record-tipo del database di analisi è strutturato con le seguenti informazioni:

- Data (gg/mm/aaaa);
- Ora (hh:mm:ss);
- Velocità (km/h);
- Lunghezza (m);
- Direzione (0 o 1);
- Corsia (sempre 1);
- Servizio (identificativo dell'apparecchiatura).

Sulla base di questa struttura dei dati, si sono elaborate una serie di schede sintetiche, aggregando i dati rilevati per ciascuna sezione dopo averli riclassificati.

I principali indicatori messi in rilievo nelle schede sintetiche predisposte sono elencati qui di seguito:

- ✓ Indicazione geografica della sezione del conteggio;
- ✓ Tipologia della strada e numero identificativo della strada;
- ✓ Data del conteggio ed intervallo orario di misurazione;
- ✓ Classificazione dei veicoli in base alla lunghezza (moto, auto, trasporto leggero o pesante);

- ✓ Passaggi, assoluti e in percentuale, per ciascuna classe di veicoli nelle due direzioni;
- ✓ Velocità media per ciascuna classe di veicoli nelle due direzioni;
- ✓ Passaggi totali, assoluti e in percentuale, per ciascuna fascia oraria nelle due direzioni;
- ✓ Grafico del flusso orario nelle due direzioni;
- ✓ Calcolo delle velocità operative V_{85} .

A questo punto, si rende necessaria un'importante precisazione sulla " V_{85} " desunta nelle schede sintetiche: essa rappresenta l'85° percentile di tutte le velocità rilevate durante l'intera giornata di conteggio per ciascuna sezione.

Tale velocità risulta, dunque, sottostimare la cosiddetta "*velocità operativa*" V_{85} , definita in letteratura come velocità non superata dall'85% delle sole autovetture che percorrono un elemento o un tronco omogeneo dell'infrastruttura in condizioni di flusso libero, cioè senza influenzare mutuamente il proprio comportamento di guida e potendo scegliere liberamente le velocità da adottare.

Pertanto, la velocità V_{85} così calcolata nelle elaborazioni di sintesi della campagna di rilevamento relativa al biennio 2003-2004 è stata individuata come parametro di riferimento da utilizzarsi in una prima fase di analisi, volta a fornire indicazioni di massima sulle caratteristiche generali del flusso veicolare interessando la globalità della rete provinciale, per cui è stata valutata in riferimento a tutto l'intervallo orario di analisi (7:00÷19:00) e all'intero spettro di traffico (senza distinzione fra classi veicolari), per cui non tiene conto delle condizioni di deflusso all'interno delle singole infrastrutture, né del forte condizionamento al regime di circolazione riconducibile all'eventuale presenza di una notevole componente di traffico pesante.

Le schede riassuntive (scheda generale, di localizzazione, dei flussi e delle velocità rilevate) riferite alla generica sezione di rilevamento sono disponibili in riferimento all'intero database.

I risultati ottenuti dall'aggregazione effettuata non fornivano indicazioni sulle reali velocità operative degli utenti, ma solo dell'ottantacinquesimo percentile della distribuzione della totalità dei passaggi veicolari, per cui si è resa necessaria una rielaborazione dei dati relativi alle campagne di conteggio del 2003 e 2004.

Nel compiere quest'operazione, il primo obiettivo è consistito nell'estrapolazione dei valori di velocità operativa del campione di utenti rilevato; in altre parole, occorre isolare quella parte del campione che più verosimilmente utilizzava l'infrastruttura in condizioni di flusso libero.

I criteri adottati nella ricerca della parte rappresentativa del campione sono stati essenzialmente due considerare i soli veicoli:

- di lunghezza compresa fra 3,0 m e 9,0 m (classi 2 e 3), assimilabili ad autovetture;
- aventi un distanziamento temporale di almeno 5 s da quelli immediatamente precedenti, per i quali si presuppone che ci sia assenza di reciproco condizionamento nella condotta di guida.

La mole dei dati elaborati e la struttura del database informatico (sequenza di fogli di calcolo concatenati fra loro) hanno generato il bisogno di mettere a punto delle opportune procedure per gestirli ed elaborarli.

Attraverso l'utilizzo dell'ambiente di programmazione *VBA (Visual Basic for Applications)* è stato possibile implementare degli algoritmi di selezione dei dati adatti a raggiungere lo scopo, sfruttando le potenzialità di calcolo e gestione delle basi di dati offerte dall'elaboratore elettronico.

Le routine adottate hanno permesso di isolare, per ciascun foglio di calcolo, i record rispondenti ai criteri di ricerca sopra elencati, nonché di riportarle in nuovi fogli di calcolo associati al medesimo file della sezione oggetto di osservazione, permettendo di risalire a grandezze quantitative, relative ad un diverso grado di aggregazione, più rispondente alle finalità ed agli obiettivi del presente studio.

Per ciascuna strada rilevata durante il biennio di osservazione 2003-2004 si è riuscito, in questo modo, ad ottenere, relativamente a ciascuna delle due direzioni di marcia, l'85° percentile delle velocità afferenti ai soli veicoli di lunghezza compresa fra 3 e 9 m e aventi un distanziamento temporale dal veicolo che precede superiore ai 5 secondi; tale valore fornisce un indicatore rappresentativo delle velocità operative in condizioni assimilabili al flusso libero, cioè in assenza di mutui condizionamenti delle condotte di guida.

Come discusso ampiamente nelle sezioni seguenti di questo lavoro teorico-sperimentale, la procedura di estrapolazione è stata applicata anche alle banche dati raccolte nel biennio di osservazioni 2006-2007.

Successivamente ogni singolo campione estrapolato dalle osservazioni effettuate sulle sezioni di monitoraggio sperimentale è stato processato con specifici strumenti di statistica per le scienze sociali al fine di ottenere la frequenza delle distribuzioni di velocità in flusso libero per intervalli di 10 km/h. In questo modo è stato possibile ricavare grandezze quali il numero di osservazioni utili, la media, i quartili, la deviazione standard, la varianza, ecc..., e quindi ricondurre i dati osservati in

forma discreta a distribuzioni normali continue con le relative significatività. Per verificare statisticamente la bontà dell'adattamento, si è scelto di utilizzare il test non parametrico di Kolmogorov-Smirnov, il quale ha una potenza elevata e non richiede ipotesi sulla distribuzione del campione essendo, appunto, un test non parametrico.

In Figura 11 si riporta a titolo di esempio l'istogramma di frequenza sulla SP25A.

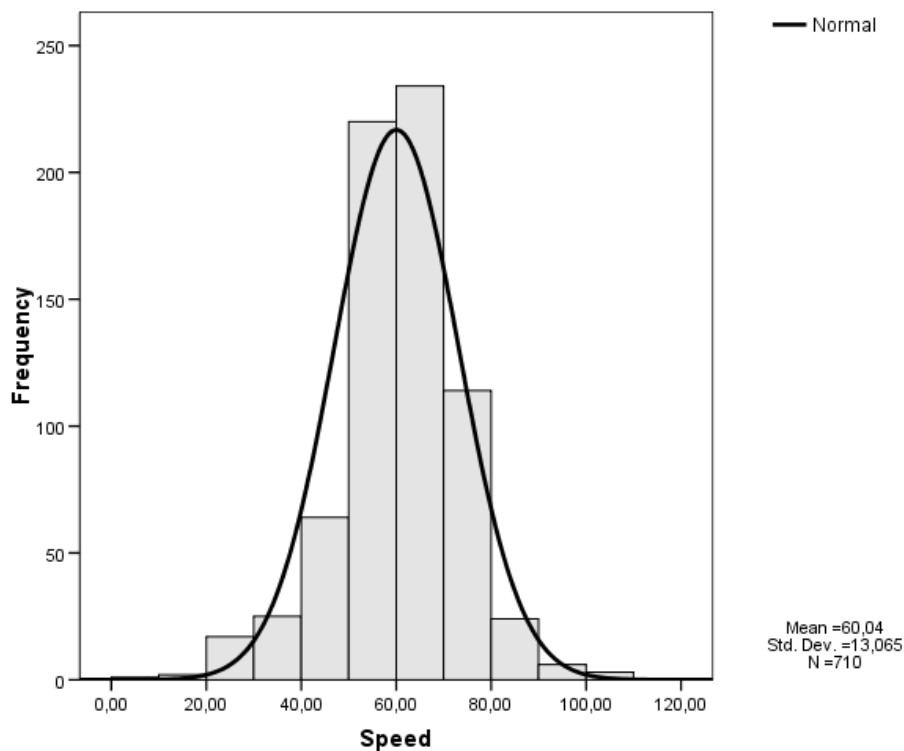


Figura 11 Istogramma di frequenza sulla SP25A.

8. MODELLI PREDITTIVI DELLE VELOCITÀ OPERATIVE

La procedura di specificazione, calibrazione e validazione dei modelli di previsione delle velocità operative è finalizzata alla messa a punto di paradigmi formali che simulino in maniera appropriata il fenomeno della distribuzione delle velocità praticate dagli utenti, in una determinata sezione di un tracciato stradale o su una parte di esso. Il metodo si fonda sull'osservazione preliminare del fenomeno reale, cioè sull'indagine delle velocità effettivamente praticate dall'utenza stradale, per poi definire una forma funzionale del modello attraverso un processo inferenziale di regressione sui dati osservati. Innumerevoli sono le ricerche e gli studi pubblicati sull'argomento, così come numerosi sono i modelli di previsione delle velocità operative, frutto di osservazioni sperimentali in varie parti del mondo, reperibili in letteratura.

Oggetto di interesse dei ricercatori, sono soprattutto le strade a carreggiata unica a due corsie e a doppio senso di marcia (*two-lane rural roads*) che solitamente presentano un peso importante nella rete stradale di ciascun paese; inoltre esse costituiscono il teatro del maggior numero di incidenti gravi che avvengono annualmente. Ognuno di questi modelli, pur fornendo importanti risultati di carattere generale e individuando una serie di variabili indipendenti adatte a correlare la geometria degli elementi con le velocità operative, non può essere considerato universalmente valido; il motivo è da ricercarsi nelle differenze, a volte sostanziali, tra una realtà nazionale e l'altra (e, a volte, anche tra diverse realtà locali all'interno dello stesso Paese) in termini di orografia del territorio attraversato, condizioni climatiche, parco veicolare, abitudini degli utenti.

Lo sforzo degli esperti è teso al superamento dei problemi che impediscono la definizione di un modello di previsione delle velocità operative sufficientemente esaustivo, con l'intento di giungere a formulazioni che possano correlare le velocità operative con le principali caratteristiche geometriche degli elementi stessi. All'interno delle normative e dei regolamenti di vari Paesi nel mondo si riscontrano, accanto ai metodi di verifica della congruenza, diverse formulazioni delle equazioni di regressione usate per stimare la velocità operativa V_{85} , ottenute sulla base di ricerche effettuate in tempi e scenari diversi; non deve stupire, quindi, che anche i risultati ottenuti siano diversi, spesso sensibilmente. Il continuo cambiamento delle abitudini di guida e delle prestazioni dei mezzi rende necessario il miglioramento di questo tipo di modelli, e la loro calibrazione sulla base di osservazioni sperimentali eseguite in tempi recenti, per renderli più aderenti alla realtà locale oggetto di analisi.

Un'analisi storica della letteratura prodotta in materia di modelli previsionali, evidenzia che il primo approccio allo studio di questo tipo di modelli era volto alla ricerca di una velocità rappresentativa del comportamento degli utenti su interi tronchi stradali, anche di notevole lunghezza, con caratteristiche geometriche simili.

Successivamente, l'individuazione di nuovi parametri adatti ad essere utilizzati come variabili indipendenti nella stima delle velocità operative ha portato gli studiosi a ricercare delle correlazioni tra le velocità operative mantenute su singoli elementi di tracciato (rettifili, curve, raccordi) e le principali caratteristiche geometriche degli elementi stessi. Allo stato attuale, i risultati migliori sembrano potersi ottenere considerando i due approcci al problema in maniera sinergica: come variabili indipendenti possono assumersi i vari parametri rappresentativi della geometria dei singoli elementi unitamente ad un parametro che tenga, invece, conto delle caratteristiche peculiari del tratto omogeneo cui gli elementi appartengono.

Le relazioni matematiche sperimentali proposte in questo lavoro sottolineano come i diversi modelli sono costruiti in modo da interpretare il comportamento dei conducenti su ciascuno degli elementi geometrici costituenti il tracciato: modelli distinti per la *velocità ambientale sul tronco omogeneo* (V_{env}), per la *velocità operativa in curva* (V_{85C}) e per la *velocità operativa in rettifilo* (V_{85T}).

Inoltre, tutte le velocità operative V_{85} possono dipendere oltre che dai parametri geometrici caratteristici del singolo elemento esaminato (lunghezza o sviluppo, raggio di curvatura, pendenza longitudinale e trasversale, sezione trasversale, ecc...), anche da altri relativi al tratto omogeneo di strada di cui l'elemento fa parte.

Nel corso di questi anni si sono ottenuti via via modelli maggiormente accurati. Questa osservazione ha spinto lo scrivente ad approfondire il tema della dipendenza della velocità operativa V_{85} su un dato elemento dalla velocità ambientale V_{amb} ed alla formulazione di modelli siffatti.

La maggiore difficoltà nel fronteggiare lo step modellistico della ricerca sta nell'individuare dei criteri di validità generale atti a suddividere il tracciato in tronchi omogenei, su ciascuno dei quali poter determinare la velocità ambientale. Questo ostacolo rappresenta il vero limite allo sviluppo dei modelli basati sulla V_{amb} o sulla cosiddetta *velocità desiderata*.

Uno degli scopi di questa ricerca è, quindi, quello di contribuire a superare tali limiti definendo dei modelli originali di previsione della velocità ambientale e delle velocità operative che abbiano una valenza più generale.

Da ultimo, occorre sottolineare che mentre per la definizione del modello di velocità operativa in curva V_{85C} si può fondare su informazioni bibliografiche molto esaurienti, nel caso dei modelli di

velocità operativa in rettifilo V_{85T} e di velocità ambientale sul tronco omogeneo V_{amb} , invece, le formulazioni disponibili nella letteratura recente sono meno numerose ed ancora in fase di perfezionamento.

S.P. 30 B																
n. sez	Direzione: "Mare - Eboli" (dir. "0")					Direzione: "Eboli -Mare" (dir. "1")					Entrambe le direzioni					
	V ₈₅	V _m	V _{med}	V _{mod}	SD	N.C. %	V ₈₅	V _m	V _{med}	V _{mod}	SD	N.C. %	V ₈₅	V _m	V _{med}	SD
1	44	34	34	31	8,69	13,40	43	34	34	34	8,39	18,29	43	34	34	8,51
2	47	35	34	40	10,02	6,82	68	53	53	55	14,38	6,44	61	46	47	15,55
3	58	47	48	53	12,72	15,46	84	64	66	51	18,41	11,30	77	56	54	18,26
4	75	57	54	71	18,46	11,43	88	64	63	66	20,35	8,97	82	61	59	19,60
5	85	65	67	80	22,13	27,43	93	72	71	73	20,31	38,85	90	68	68	21,48
6	87	66	66	75	21,75	5,17	97	74	76	70	23,11	2,08	96	70	71	22,83
7	68	51	48	49	18,47	5,19	87	65	64	44	20,10	2,22	80	58	55	41
8	74	52	49	44	19,79	6,45	80	59	61	61	20,19	6,55	78	56	55	48
9	67	50	49	52	17,82	8,78	78	53	50	45	21,89	27,59	74	52	49	20,05
10	70	51	49	45	17,91	10,48	78	53	50	37	20,69	10,16	75	52	50	37
11	70	50	49	47	18,43	11,01	88	64	62	69	25,06	3,77	81	57	52	47
12	75	54	52	60	19,47	2,24	85	60	58	41	23,13	6,57	79	57	53	43
13	70	52	50	43	17,58	3,30	84	59	56	33	22,17	4,26	79	56	53	56
14	69	49	47	39	17,15	10,58	89	62	62	82	22,30	6,61	80	57	54	37
15	65	49	47	42	16,36	5,38	77	58	56	57	19,61	2,96	73	54	50	38
16	56	42	41	40	13,52	6,45	80	61	60	71	20,78	6,63	74	52	49	41
17	62	47	45	45	14,44	5,65	65	49	48	43	14,57	5,10	63	48	47	45
18	59	44	43	44	13,42	5,59	64	46	45	45	18,07	4,17	63	45	44	45
19	54	36	32	24	16,48	5,57	61	42	38	35	16,19	8,52	57	39	35	36
20	57	44	42	43	12,44	4,23	68	52	52	62	16,57	12,90	64	47	45	43
21	78	61	60	59	17,49	6,27	90	67	67	79	21,90	1,56	86	64	63	59
22	81	60	61	56	21,39	52,45	90	67	67	82	22,73	40,09	85	63	63	56
23	97	75	78	80	22,04	7,00	94	71	73	73	23,40	3,81	95	73	75	80
24	93	67	67	97	23,90	4,10	96	75	76	74	21,58	4,13	94	71	73	75
25	86	62	68	72	22,66	75,42	82	60	59	44	21,29	21,43	84	61	60	44
26	89	63	63	73	23,34	6,44	94	68	71	75	23,66	5,98	90	65	67	73
27	89	67	66	66	22,27	4,11	83	62	62	70	21,17	1,16	87	64	64	70
28	85	65	64	60	21,30	5,05	83	62	60	58	19,14	3,64	84	64	62	60
29	85	55	54	66	27,44	18,22	78	56	57	75	21,55	5,47	81	56	56	63
30	74	58	56	62	17,59	3,33	88	67	64	56	20,35	7,53	84	62	61	56
31	71	49	49	31	19,61	5,61	65	49	46	41	17,46	22,47	70	49	47	51
32	67	48	46	39	18,09	3,90	73	52	49	54	19,53	5,57	71	50	47	54
33	80	58	59	69	20,86	5,71	74	53	50	54	19,06	31,76	77	56	54	50
34	77	56	54	71	19,74	5,09	79	57	57	45	19,75	6,35	78	56	56	45
35	71	51	46	37	18,44	5,54	70	51	49	49	18,92	7,79	70	51	48	37
36	70	52	50	38	17,45	4,31	74	57	56	63	17,19	7,96	72	54	53	56
37	73	51	49	37	19,51	7,07	67	49	47	58	16,20	7,46	71	50	48	50
38	70	49	45	33	18,49	4,49	71	51	48	42	17,98	8,91	71	50	46	42
39	77	56	54	56	20,15	2,66	72	53	53	34	18,68	2,85	74	55	54	56
40	69	51	48	47	16,90	4,48	75	56	53	40	19,03	6,15	73	53	51	47
41	70	52	51	46	17,79	5,03	67	49	47	53	17,81	8,66	69	51	48	35
42	70	48	48	41	21,88	10,65	63	44	44	37	17,83	10,22	66	46	45	41

Figura 12 Esempi di risultati del filtraggio della SP30b

Lo studio della popolazione delle velocità rilevate, può fornire indicazioni sulla funzione di distribuzione e le sue proprietà, mentre le schede di sintesi come quella rappresentata in figura consentono di conoscere alcune grandezze statistiche.

Tuttavia, per gli scopi enunciati i parametri statistici più significativi sono gli ottantacinquesimi percentili delle velocità rilevate in ciascuna sezione, calcolati distintamente per le due direzioni.

Inoltre, ai fini dell'elaborazione, è importante individuare la posizione della sezione lungo il tracciato e, soprattutto, il tipo di elemento su cui essa si trova. Per questi motivi, sono state realizzate delle altre tabelle di riepilogo relative ad ogni strada, che contengono informazioni inerenti: la posizione delle sezioni, l'elemento di appartenenza, i principali dati geometrici dell'elemento stesso e le velocità operative V_{85} campionarie. Nelle tabelle sono state indicate anche le velocità ambientali, coincidenti con il valore massimo delle velocità operative rilevate nei tratti omogenei in cui ogni strada è stata suddivisa.

Si può intuire, anche alla luce di quanto è stato detto nei paragrafi precedenti, che questo tipo di aggregazione dei dati non facilita l'implementazione di modelli della velocità operativa sui vari elementi costituenti un tracciato stradale, né fornisce un supporto adatto allo sviluppo di modelli predittivi della velocità ambientale. Pertanto, è necessaria una riorganizzazione dei dati creando degli archivi di riferimento che siano più rispondenti alle esigenze della ricerca e nel rispetto degli obiettivi prefissati. Nel prosieguo vengono chiarite le modalità che hanno condotto alla formazione dei database e si descriverà compiutamente la struttura degli stessi.

Particolare attenzione è dedicata, invece, al problema del riconoscimento dei tronchi omogenei in un tracciato oggetto di studio: si tratta di una questione di notevole importanza ai fini della conoscenza della velocità ambientale. Il parametro velocità ambientale V_{amb} è in grado di esprimere quantitativamente il comportamento dell'utente legato alle caratteristiche “ambientali” di un tratto stradale. Condizione necessaria alla corretta valutazione della velocità ambientale, sia essa effettuata mediante rilievo diretto ovvero con l'ausilio di modelli predittivi, è la definizione di tronchi stradali omogenei cui associare la velocità stessa. Ciascun tronco dovrà possedere delle peculiarità che gli derivano dall'ambiente attraversato: ad esempio, l'orografia del territorio inciderà sul suo andamento plano-altimetrico, il clima della micro-zona in cui si sviluppa inciderà sulla visibilità o sullo stato della pavimentazione, la presenza elementi naturali anche esterni alla carreggiata – quali alberi, folta vegetazione – influirà sulla “leggibilità” del tracciato, ecc... Questi fattori “ambientali”, a seconda della loro entità, inducono un diverso condizionamento sulla massima velocità che i guidatori attuano lungo il tronco stradale: in altre parole, a tronchi omogenei differenti corrisponderanno velocità ambientali distinte.

Per individuare i tratti di un tracciato planimetrico aventi caratteristiche omogenee cui assegnare una velocità ambientale, si è fatto riferimento alle indicazioni presenti nell'attuale normativa tedesca, già citata in precedenza. Essa introduce, per le strade extraurbane ad unica carreggiata, doppio senso di marcia e due corsie, il concetto di “tortuosità media” fornendo dei criteri per la misura della stessa e utilizzandola come parametro di riferimento per la determinazione delle velocità operative, da confrontare durante la fase di verifica di congruenza del tracciato.

Per valutare la tortuosità media, si parte dalla definizione di *CCR* (*Curvature Change Rate*), ossia il tasso di variazione della curvatura, che in un tratto curvilineo esprime il rapporto tra la deviazione assoluta che si verifica tra inizio e fine elemento e la distanza percorsa lungo l'elemento stesso. Il *CCR* può essere riferito ad una singola curva (*CCR_s*, *Curvature Change Rate of the Single curve*) oppure ad una successione di elementi del tracciato (*CCR medio*): in quest'ultimo caso esso viene definito come il rapporto tra la deviazione angolare totale cumulata lungo il tratto considerato (somma dei valori assoluti delle singole deviazioni γ_i) e la sua lunghezza complessiva L . Tale grandezza appare più adatta a rappresentare una misura della tortuosità media, e può essere determinata misurando il coefficiente angolare della retta di regressione lineare che interpola i punti del diagramma della cumulata delle deviazioni (in valore assoluto) in funzione della progressiva, relativo ad un tronco stradale, cioè ad una successione di rettifili, curve ed eventuali raccordi; detto coefficiente angolare rappresenta, infatti, il *CCR medio* dello specifico tratto a cui esso è associato, e come tale fornisce una misura della tortuosità media corrispondente.

Ciò premesso, con riferimento a ciascuna strada esaminata, è possibile analizzare il diagramma delle deviazioni angolari cumulate (in modulo) in funzione della progressiva chilometrica, individuando uno o più tronchi caratterizzati da una specifica tortuosità media: essi saranno caratterizzati da diverse pendenze della regressione lineare dei punti del grafico delle deviazioni o porzioni di esso.

Una volta individuati i tratti, ad ognuno viene associato un valore della velocità ambientale, corrispondente al valore massimo fra le velocità operative misurate su rettifili più lunghi o nelle curve di più ampio raggio appartenenti allo stesso tratto omogeneo.

La suddivisione in tronchi omogenei delle strade oggetto di studio è requisito imprescindibile per l'individuazione delle velocità ambientali: questa scelta consente di identificare i tratti in cui dividere i tracciati non solo in funzione delle caratteristiche geometriche delle infrastrutture (curvatura media), ma anche di altri fattori che caratterizzano lo spazio stradale e che incidono indirettamente sulle velocità attuate dagli utenti (dati noti).

La valutazione dei tronchi omogenei, quindi, non è condotta unicamente attraverso la massimizzazione del coefficiente di determinazione delle rette interpolanti il diagramma progressiva – cumulata, ma considera l’infrastruttura analizzata nella sua globalità, anche attraverso valutazioni “a posteriori” sul comportamento degli utenti. D’altro canto, alcune variabili propriamente “ambientali” sono comuni a tutte le strade oggetto di indagine, perché dipendono dalla loro localizzazione e dalle condizioni in cui sono stati effettuati i rilievi: ad esempio tutte le infrastrutture rilevate presentano un andamento prevalentemente pianeggiante con pendenze longitudinali inferiori al 6% ed un livello di degrado della pavimentazione medio-alto; quanto ai monitoraggi, sono stati eseguiti sempre in buone condizioni meteorologiche e di visibilità.

Una revisione generale dei dati geometrici afferenti ai tracciati oggetto di studio è, pertanto, necessaria. In particolare, si controllano le successioni degli elementi geometrici lungo il tracciato, ridefinendo alcune delle loro caratteristiche geometriche (lunghezza, larghezza della carreggiata, ecc...) e si costruiscono i diagrammi della deviazione angolare cumulata lungo le progressive.

Il numero dei tronchi omogenei in cui è stata suddivisa ciascuna delle infrastrutture considerate non è superiore a due. Ciò può essere imputato a diversi fattori, tra i quali la limitata estensione spaziale dei tracciati e la sostanziale uniformità del contesto ambientale in cui essi si sviluppano. Pertanto, nell’interpolare i diagrammi deviazione cumulata – progressiva, non si riescono ad individuare molti tronchi aventi *CCR* medio differenti, né, d’altra parte, la suddivisione può spingersi al punto da considerare numerosi tratti ma di sviluppo molto limitato. La ripartizione di un tracciato in due tratte omogenee è stata effettuata ipotizzando, dapprima, una suddivisione di tentativo e valutando il coefficiente di regressione delle rette interpolanti i rispettivi tronchi omogenei sul diagramma delle deviazioni cumulate; dopodiché, si sono ipotizzate altre suddivisioni ottenendo degli nuovi coefficienti di determinazione. Infine, dal confronto dei vari gradi di correlazione, unitamente a valutazioni di carattere generale, è scaturita la suddivisione finale.

In questa fase della ricerca, nel tentativo di fornire un metro di giudizio il più obbiettivo possibile, si confrontano per ciascuna strada i coefficienti di determinazione delle rette di regressione lineare del diagramma deviazione cumulata – progressiva, relative a tutte le possibili suddivisioni del tracciato in due tronchi omogenei. Il risultato è stato la creazione di grafici dove in ascissa viene indicato il numero di elementi (curve e rettifili) costituenti il primo ed il secondo tronco, che dà come somma sempre il numero totale di elementi costituenti il tracciato, ed in ordinata si riporta il coefficiente di determinazione della retta di regressione relativa ai tronchi “riportati in ascissa”.

Un secondo tipo di grafico riporta in ascissa il numero di elementi costituenti il primo ed il secondo tronco, mentre in ordinata è indicato il coefficiente di regressione medio tra quelli delle rette interpolanti il primo ed il secondo tronco nel diagramma delle deviazioni cumulate; viene riportata, inoltre, la retta orizzontale corrispondente al valore che deriva dal considerare la strada in questione come un unico tronco omogeneo.

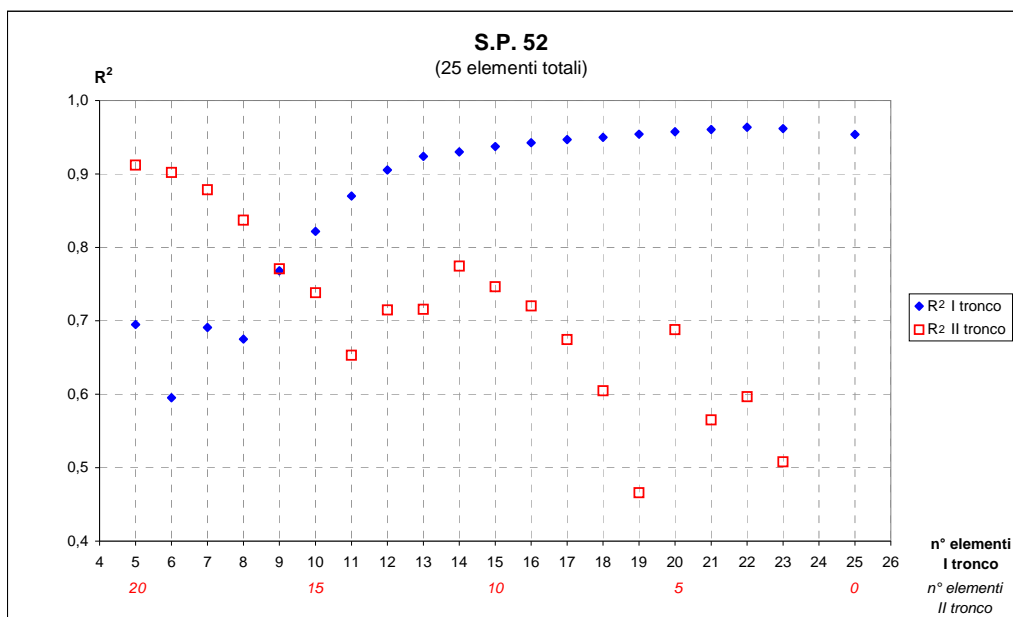


Figura 13 Coefficienti di determinazione, al variare dei tronchi omogenei.

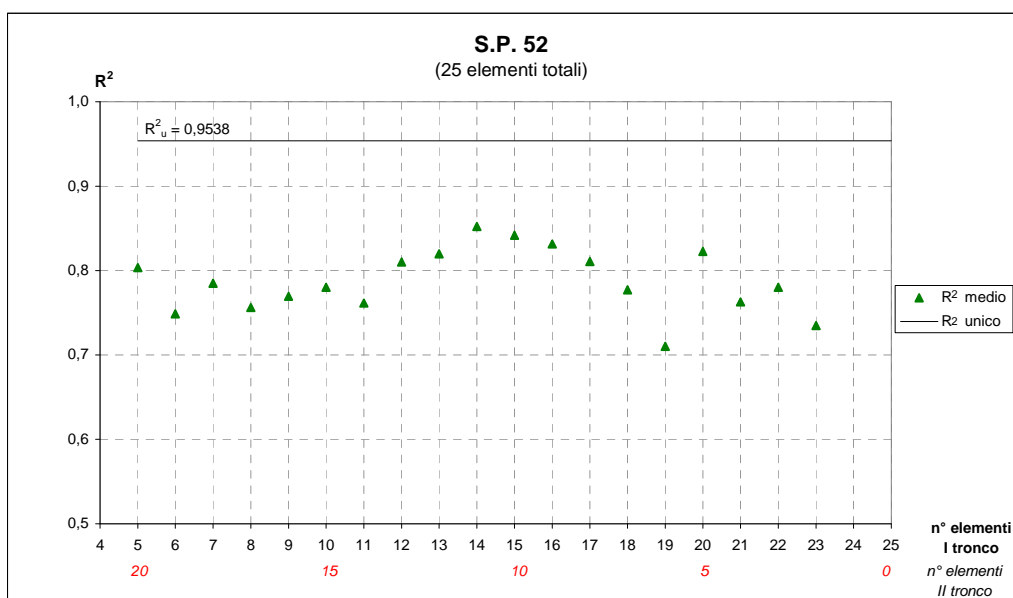


Figura 14 Coefficiente di determinazione medio, al variare dei tronchi omogenei.

Un'attenta disamina delle infrastrutture e dei diagrammi porta a formulare i seguenti criteri indicativi per la suddivisione di un tracciato stradale in tronchi omogenei:

- un tronco omogeneo dev'essere sufficientemente esteso per poter essere qualificato come tratto che consente all'utente di sviluppare la velocità desiderata: in via orientativa, si può affermare che la lunghezza del tronco non dev'essere inferiore ai 900÷1000 m;
- se la valutazione viene condotta per interpolazione lineare del diagramma delle deviazioni cumulate, un singolo elemento mal si adatta ad essere interpretato come tronco omogeneo: ad esempio, nel caso di un lungo rettilineo, la progressiva e la deviazione cumulata risulterebbero non correlate ed il *CCR* medio tenderebbe a zero;
- il coefficiente di determinazione della retta di regressione interpolante i tratti del diagramma progressiva – deviazione cumulata, per un tronco omogeneo dev'essere sufficientemente elevato, compatibilmente con lo sviluppo e la tortuosità del tracciato: a titolo indicativo, si può porre $\rho^2 \geq 0,70$;
- nell'ipotesi che il tracciato si presti ad essere suddiviso in massimo 2 tronchi omogenei, se i ρ^2 medi delle rette di regressione relative alle coppie di tronchi omogenei in cui è possibile suddividere il tracciato sono sempre inferiori al ρ^2 relativo al tronco unico, è preferibile trattare la strada come un solo tratto omogeneo; in caso contrario, devono essere valutate le caratteristiche della specifica infrastruttura prima di effettuare l'eventuale suddivisione e, comunque, non è detto che a quest'ultima corrisponda il ρ^2 medio più elevato.

L'insieme delle suddette considerazioni porta alla definizione dei tronchi omogenei per caratteristiche geometriche di un tracciato stradale secondo lo schema riassuntivo che segue:

Tabella 11 Definizione dei Tronchi Omogenei e loro Caratteristiche.

	Strada	Tronco omogeneo	Lunghezza	Larghezza media della carreggiata	V_{amb}	CCR_{med}
			[km]	[m]	[km/h]	[gon/km]
1	S.P. 30b	I	6,189	6,69	97,2	9,601
2	S.P. 52	I	3,459	6,73	86,5	159,277
3	S.P. 312	I	8,281	5,88	87,9	47,156
4	S.P. 262	I	7,083	7,50	102,7	9,916
5	S.S. 426	I	3,197	7,05	96,0	63,288
6	S.S. 426	II	0,886	7,29	82,9	235,793
7	S.S. 166	I	5,337	6,24	72,5	589,264
8	S.S103(I)	I	1.369	7.49	79.1	371.430
9	S.S 103(I)	II	1.023	7.49	95,0	131.270
10	S.S 103(II)	I	1.679	6.58	86,0	188.240
11	S.S 103(II)	II	1.105	6.58	63,0	503.170
12	S.P.135	I	7.922	6.38	90,0	30.0480

In totale si ottengono 12 tronchi omogenei (*homogeneous sections*), con lunghezze variabili tra 0,9 ed 8,3 km e CCR medi compresi fra 9,6 e 589,3 gon/km.

La V_{amb} indicata corrisponde al massimo degli ottantacinquesimi percentili delle distribuzioni di velocità rilevate sui tronchi omogenei in esame.

Si tratta dunque di un valore sperimentale, derivante dai dati delle campagne di monitoraggio sperimentale di traffico opportunamente “filtrati” secondo la procedura descritta.

Avendo a disposizione una sufficiente popolazione di coppie tortuosità media – velocità ambientale corrispondente, si può ricavare una correlazione tra la variabile dipendente V_{amb} e il parametro geometrico CCR medio, da utilizzare come relazione generale per la stima della velocità ambientale su altre strade assimilabili, per le quali non vengano effettuati rilievi.

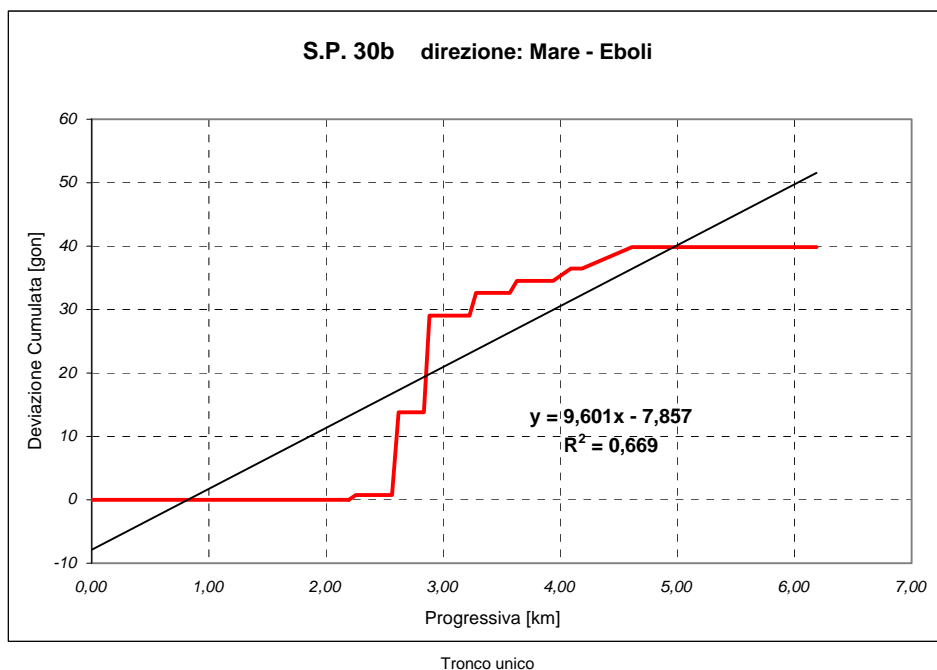
Si sottolinea altresì che la conoscenza delle distribuzioni di velocità operative lungo un dato tracciato costituisce uno strumento cognitivo aggiuntivo per la suddivisione dello stesso in tratti omogenei.

Però, mentre in un’analisi di tipo sperimentale è possibile disporre di queste informazioni, tali dati non saranno noti a priori in sede progettuale, di programmazione degli interventi su una strada esistente e di definizione di un nuovo tracciato: in questo caso, per individuare correttamente i tronchi omogenei, bisognerà affidarsi all’osservazione diretta di tutti i fattori ambientali precedentemente menzionati.

Si riportano nel seguito i diagrammi progressiva–deviazione cumulata delle 8 strade esaminate, con la rappresentazione delle rette di interpolazione che identificano i tronchi omogenei: il coefficiente angolare rappresenta il CCR med del tronco.

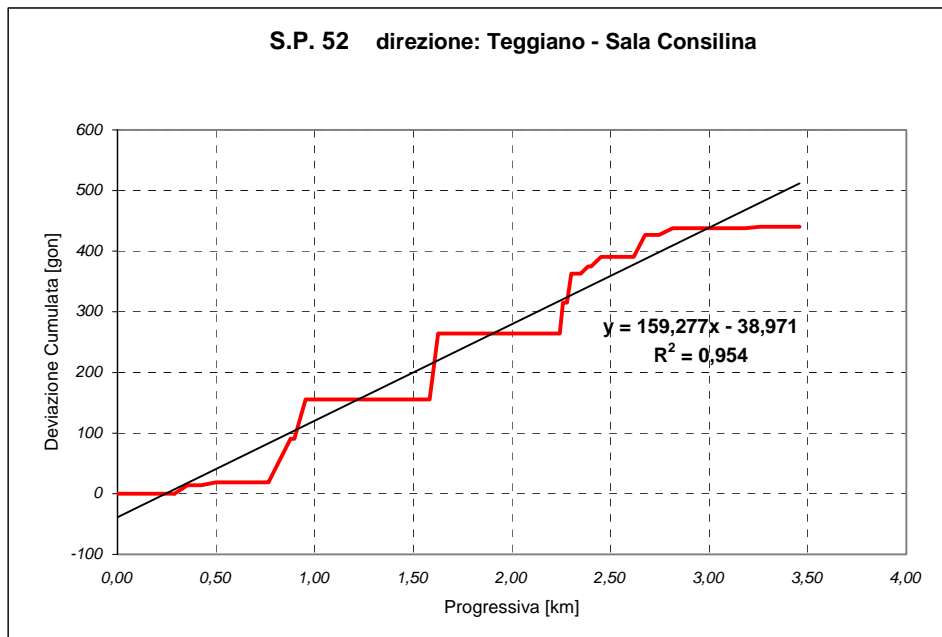
I diagrammi sono direzionali, in quanto la successione degli elementi dipende dal verso di percorrenza della strada; tuttavia, si può verificare che, plottando i grafici correttamente, comunque si scelga la direzione, la pendenza della retta di regressione di uno stesso tratto di diagramma ha sempre lo stesso valore.

In altre parole la tangente dell'angolo formato dalla linea di tendenza e l'asse delle ascisse (delle progressive) e quindi il *CCR* medio del tronco omogeneo non subisce cambiamenti.



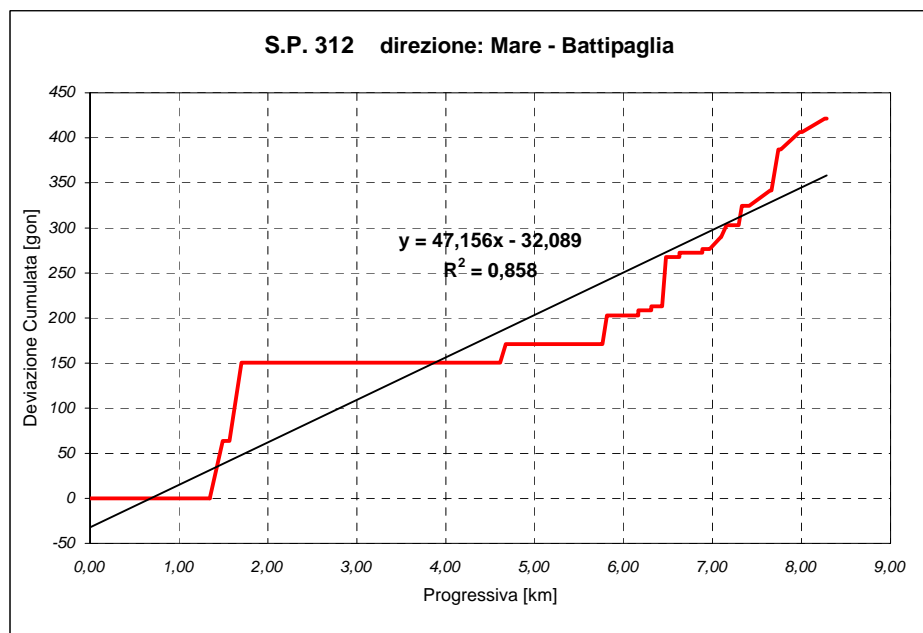
Tronco	N° elementi	N° rettifili	N° curve	Lunghezza [km]	CCR _{med} [gon/km]	V _{amb} [km/h]
I	15	8	7	6,189	9,6012	97,15

Figura 15 Tronco omogeneo della S.P. 30b.



Tronco	N° elementi	N° rettifili	N° curve	Lunghezza [km]	CCRmed [gon/km]	V _{amb} [km/h]
I	25	13	12	3,459	159,2773	86,45

Figura 16 Tronco omogeneo della S.P. 52.



Tronco	N° elementi	N° rettifili	N° curve	Lunghezza [km]	CCRmed [gon/km]	V _{amb} [km/h]
I	29	17	12	8,281	47,1557	87,90

Figura 17 Tronco omogeneo della S.P. 312.

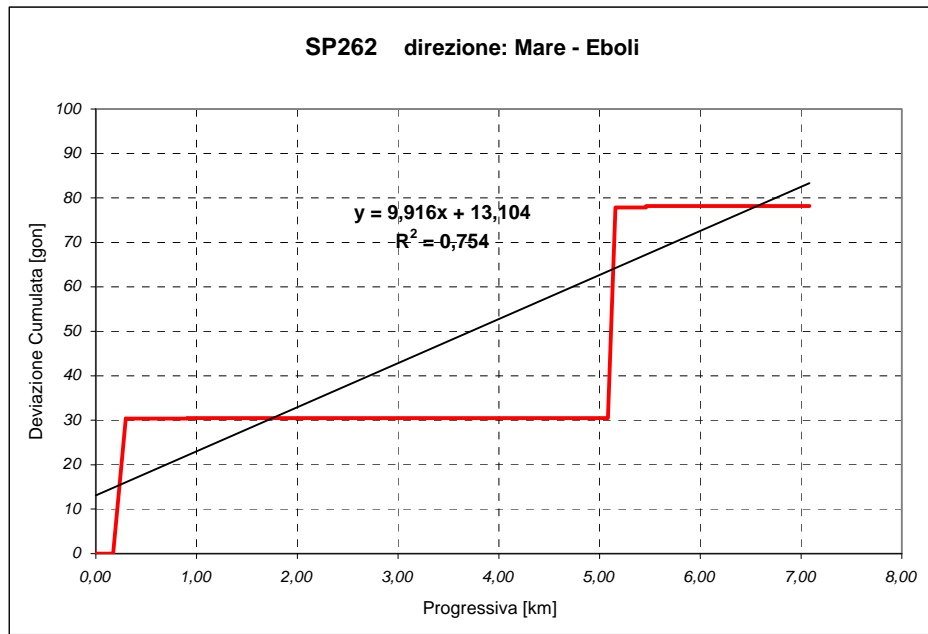


Figura 18 Tronco omogeneo della S.P. 262.

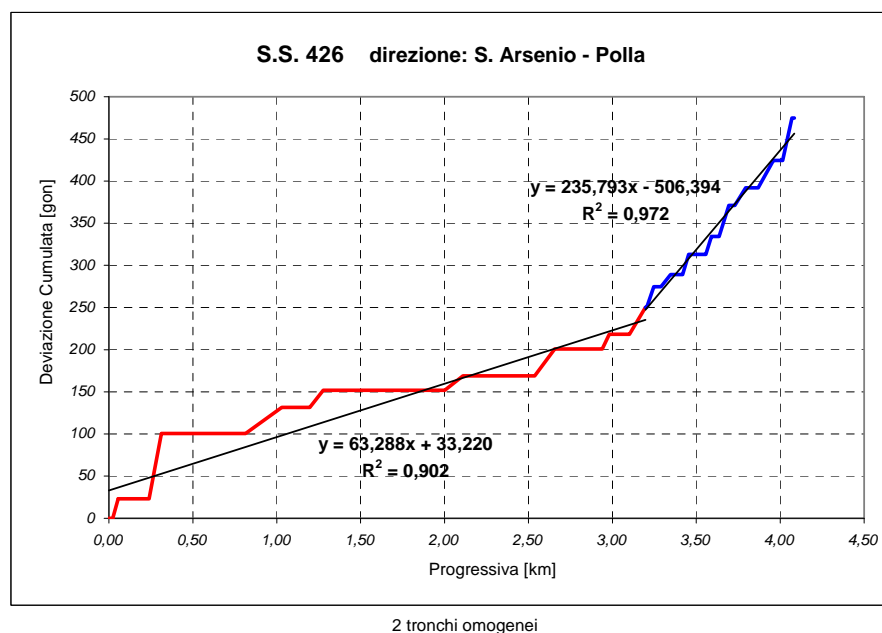
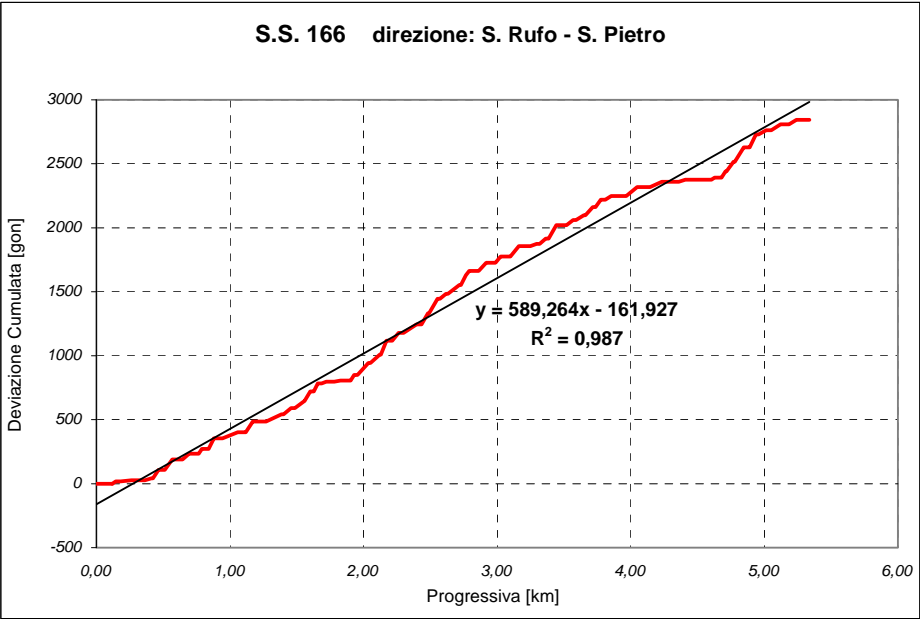


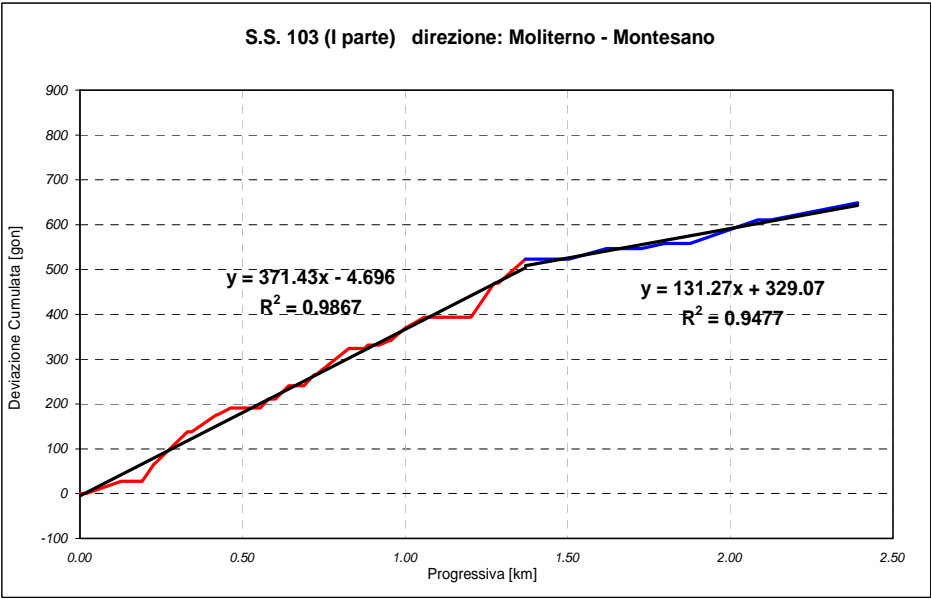
Figura 19 Tronchi omogenei della S.S. 426.



Tronco unico

Tronco	N° elementi	N° rettifili	N° curve	Lunghezza [km]	CCRmed [gon/km]	V _{amb} [km/h]
I	103	52	51	5,337	589,2643	72,50

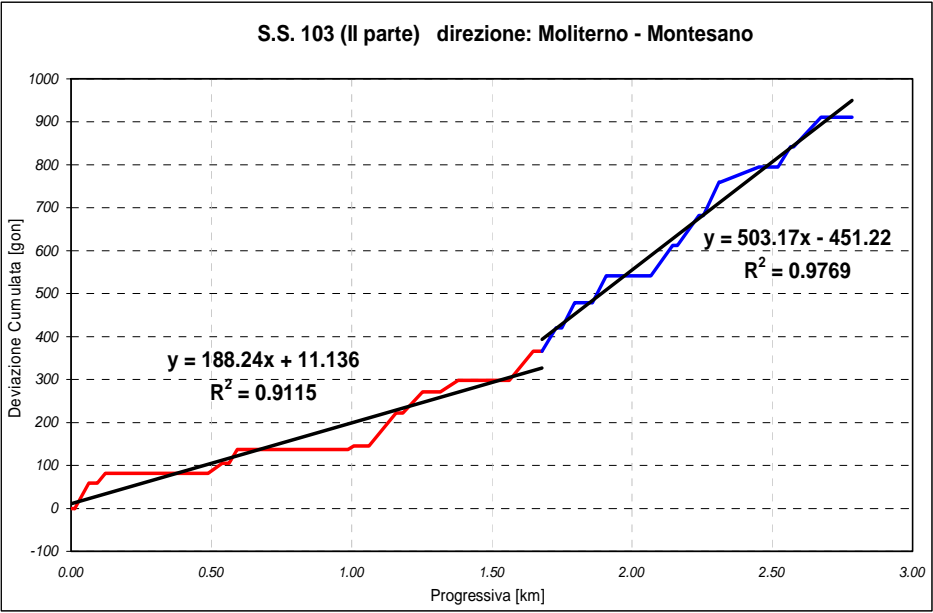
Figura 20 Tronco omogeneo della S.S. 166.



2 tronchi omogenei

Tronco	N° elementi	N° rettifili	N° curve	Lunghezza [km]	CCRmed [gon/km]	V _{amb} [km/h]
I	30	15	15	1.369	371.43	79.10
II	8	4	4	1.023	131.27	95.00

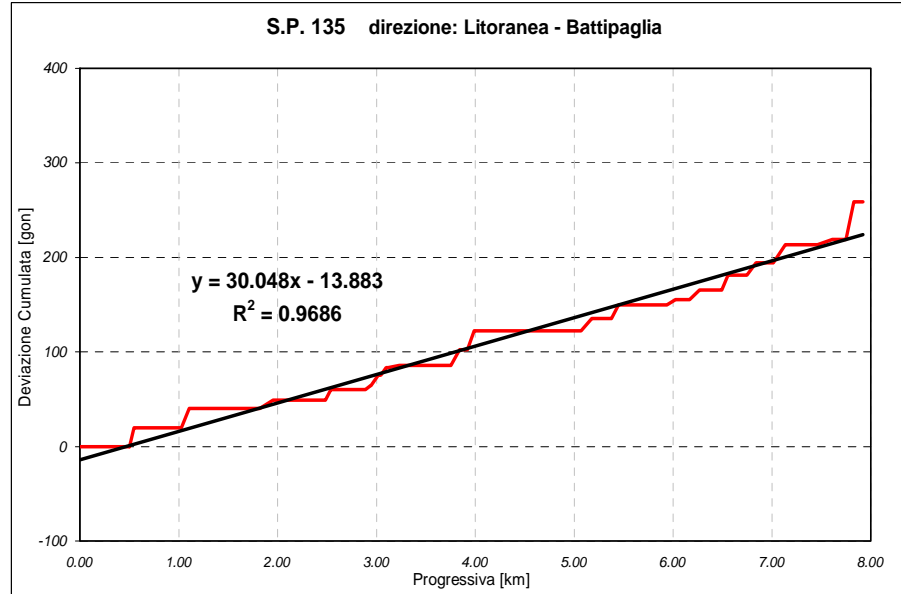
Figura 21 Tronchi omogenei della S.S. 103 (I parte).



2 tronchi omogenei

Tronco	N° elementi	N° rettificabili	N° curve	Lunghezza [km]	CCRmed [gon/km]	Vamb [km/h]
I	19	10	9	1.679	188.24	86.00
II	18	9	8	1.105	503.17	63.00

Figura 22 Tronchi omogenei della S.S. 103 (II parte).



Tronco unico

Tronco	N° elementi	N° rettificabili	N° curve	Lunghezza [km]	CCRmed [gon/km]	Vamb [km/h]
I	39	20	19	7.922	30.048	90.00

Figura 23 Tronco omogeneo della S.P. 135.

Il lavoro di ricerca svolto si sviluppa essenzialmente in due fasi successive:

1. Analisi teorica: ha permesso di approfondire la conoscenza del fenomeno delle velocità reali e dei criteri preposti alla misura e previsione delle stesse;
2. Indagine sperimentale: ha fornito i risultati derivanti dall'osservazione diretta dei comportamenti di guida su alcune infrastrutture prescelte nell'ambito della rete stradale di competenza dell'ente provinciale salernitano.

Affinché le attività delle prime due fasi possano dare un contributo efficace all'implementazione di nuovi modelli predittivi delle velocità operative, è necessario che le informazioni raccolte (principalmente quelle di tipo quantitativo-numerico) siano sottoposte ad un accurato esame preliminare, onde garantirne la conformità all'utilizzo per il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

La procedura di selezione dei dati porta alla creazione di tabelle di riepilogo per ognuna delle strade monitorate. Tuttavia questa forma di organizzazione dei dati risulta di impiego poco pratico ai fini della specificazione dei modelli di velocità, in quanto non consente di riconoscere agevolmente i diversi elementi che compongono il tracciato e quindi le loro caratteristiche geometriche; per di più, alcune delle grandezze impiegate come variabili indipendenti nelle formulazioni esistenti in letteratura, non vengono richiamate per motivi legati alla leggibilità delle tabelle medesime.

La realizzazione di un database opportunamente strutturato è rivolta al superamento di tali limiti ed al miglioramento dell'organizzazione delle informazioni raccolte.

Un primo esempio di corrispondenza sistematicamente organizzata tra i dati di traffico e gli specifici elementi del tracciato stradale cui si riferiscono, si è avuto con la definizione dei cosiddetti tronchi omogenei. Le tratte individuate, la loro localizzazione, i parametri geometrici più significativi ed, inoltre, le velocità ambientali reali, ottenute come massimi valori delle velocità operative V_{85} attuate su ciascun tronco, sono dati su cui costruire la variabile indipendente del modello.

Questo tipo di organizzazione delle misure consente di riconoscere immediatamente gli elementi oggetto d'interesse e le possibili relazioni di dipendenza tra velocità ambientale V_{amb} rilevata e grandezze geometriche misurate. Tale fatto tornerà utile nelle analisi di regressione.

Per costruire la base di dati relativa ad altri elementi del tracciato plano-altimetrico, basta seguire un procedimento analogo a quello appena indicato, che generalmente si articola nei seguenti steps:

- individuazione dell'elemento (tipologia, posizione sull'infrastruttura);
- misura delle principali grandezze che lo caratterizzano;
- raccolta di dati geometrici riguardanti gli elementi precedente e/o successivo, ove presentino una relazione d'interdipendenza con quello oggetto di studio;
- estrapolazione dei rispettivi parametri statistici inerenti le velocità rilevate, in particolar modo, determinazione dell'85° percentile.

Le sezioni monitorate sulle *curve circolari* (salvo poche eccezioni) sono quelle centrali.

I valori sperimentali di velocità operative V_{85} sono computati nel relativo archivio e si riferiscono sempre alle sezioni al centro della curva.

Le grandezze geometriche più interessanti dell'elemento sono:

- Raggio;
- Sviluppo;
- Deviazione angolare tra i suoi estremi.

Altri parametri derivati da esse e comunemente impiegati in letteratura, sono il DC ed il CCR_S .

Le stesse grandezze geometriche possono essere valutate per la curva precedente, mentre dell'eventuale rettilineo che precede interessa soprattutto la lunghezza.

Altre grandezze legate alla sede stradale ed alle proprietà del tracciato sono:

- Larghezza della carreggiata;
- CCR medio del tronco stradale omogeneo;
- Velocità ambientale del tronco di appartenenza.

La banca dati inerente ai *rettifili* è fondata sulla scelta dei soli elementi “dipendenti”, ovvero di quei rettifili su cui, verosimilmente, gli utenti non riescono a sviluppare la velocità desiderata.

La lunghezza del rettilineo è certamente un indicatore necessario – pur non essendo l'unico – per poter operare una distinzione in tal senso.

Dall'esame della letteratura pertinente, si è visto che in rettilinei aventi uno sviluppo notevole, i fattori che contribuiscono a determinare le velocità sostenute sono molteplici e, spesso, di difficile individuazione; essi presentano rapporti molto variabili con le velocità operative ed è difficile stabilire delle relazioni dalla buona affidabilità.

Nel caso specifico delle strade monitorate all'aumentare della lunghezza aumenta anche il numero di interconnessioni con le infrastrutture esistenti intersecate, le quali rendono la circolazione veicolare da flusso ininterrotto ad interrotto.

In fase di analisi preliminare di regressione per distinguere i rettifili dipendenti da quelli indipendenti, è stato scelto un valore “di soglia” della lunghezza pari a 750 m. In più, il rettifilo deve poter essere “percepito come tale” e non rappresentare un tratto di mera continuità geometrica tra due curve successive: a tale scopo è stato fissato per la lunghezza un limite inferiore di 50 m.

In definitiva, si prendono in considerazione i rettifili di sviluppo compreso tra 50 e 750 m, per i quali sono rilevati la larghezza della carreggiata, il *CCR* medio del tratto stradale omogeneo di appartenenza e la corrispondente V_{amb} rilevata: quest'ultima, pertanto, non potrà essere attinta sui rettifili in esame. Si misurano, inoltre, il raggio e la V_{85} relativi alla curva immediatamente precedente. Non è stata ritenuta rilevante la pendenza longitudinale, peraltro sempre inferiore al 6% per i tracciati in esame.

Quanto alle velocità operative, si è scelto di indicare come velocità rappresentativa di un assegnato rettifilo, la massima tra le velocità operative rilevate sull'elemento stesso.

Ricordando che in tutti i siti di studio sono state effettuate misurazioni di traffico in entrambi i sensi di marcia, si comprende come ogni sezione possa essere “sdoppiata”, considerandola appartenente a due tratti percorsi in direzioni opposte; per tal motivo le sezioni campionarie risultano in numero doppio rispetto alle progressive risultanti dalla geometrizzazione.

Lo “sdoppiamento” delle sezioni fornisce indicazioni di grande utilità laddove si punti alla creazione di modelli dipendenti dalla velocità ambientale.

Infatti, supponendo che il comportamento del conducente risenta della condotta di guida nel percorrere gli elementi precedenti ad una data sezione, è evidente che l'esperienza è diversa a seconda della provenienza dell'utente e tuttavia, su uno stesso tronco omogeneo, i risultati dei rilevamenti nelle due direzioni non dovrebbero essere molto difforni a meno di piccoli fattori di singolarità intrinseche ed individuali.

Infine, occorre precisare che quando si parla delle strade oggetto di studio ci si riferisce alle 8 arterie della rete stradale di competenza provinciale salernitana, i cui dati di rilevamento sono stati acquisiti ed hanno fornito un contributo decisivo alle elaborazioni proposte nel presente lavoro.

Si tratta di strade monitorate nel biennio 2006-2007: SP30B, SP312, SP52, SP262, SP135, SS426, SS166 e SS103.

Nelle seguenti tabelle si riportano le principali informazioni per le curve ed i rettifili.

Tabella 12 Base di Dati per le Curve Circolari (103 Curve, 206 Sezioni Campionarie).

Strada	Sezione	V_{85c} [km/h]	R [m]	CCRs [gon/km]	Larghezza carreggiata [m]	numerosità del campione
S.P. 30b	18	59,05	280	227,364	6,10	134
		64,00	280	227,364	6,10	160
	21	78,00	200	318,310	5,80	172
		90,30	200	318,310	5,80	190
	25	86,20	2000	31,831	6,20	37
		82,30	2000	31,831	6,20	90
S.P. 52	49	65,00	100	633,539	6,80	116
		61,75	100	633,539	6,80	101
	53	72,80	400	160,070	6,80	99
		70,30	400	160,070	6,80	128
	60	77,00	2000	31,839	6,80	122
		81,00	2000	31,839	6,80	202
S.P. 312	9	67,00	145	438,897	6,50	159
		58,00	145	438,897	6,50	89
	38	62,00	200	318,310	5,00	229
		72,00	200	318,310	5,00	198
	55	41,00	50	1273,240	5,00	177
		44,60	50	1273,240	5,00	107
	62	75,00	600	106,103	5,50	180
		71,00	600	106,103	5,50	182
	64	69,70	300	212,207	5,50	132
		66,95	300	212,207	5,50	88
	68	64,00	100	636,620	5,00	274
		69,00	100	636,620	5,00	213
	72	72,00	900	70,736	5,50	151
		71,00	900	70,736	5,50	95
	74	52,00	110	578,745	5,00	174
		53,00	110	578,745	5,00	213
	76	70,90	700	90,946	5,00	108
		75,00	700	90,946	5,00	79
	78	63,00	1100	57,875	5,00	99
		69,00	1100	57,875	5,00	172
S.P. 262	31	71,00	100	640,269	7,50	153
		63,00	100	640,269	7,50	118
S.S. 426	4	50,05	90	707,355	6,80	174
		58,70	90	707,355	6,80	223
	10	50,00	60	1061,033	5,90	227
		45,00	60	1061,033	5,90	197
	18	80,00	450	141,471	7,00	240
		82,80	450	141,471	7,00	29
	24	68,00	250	254,648	6,30	136
		91,60	250	254,648	6,30	129
	34	75,00	400	159,155	7,60	149
		78,00	400	159,155	7,60	58

Strada	Sezione	V_{85C} [km/h]	R [m]	CCRs [gon/km]	Larghezza carreggiata [m]	numerosità del campione
S.S. 426	41	67,80	240	265,258	6,50	174
		74,00	240	265,258	6,50	149
	47	80,75	150	424,413	7,30	176
		83,00	150	424,413	7,30	206
	51	81,00	190	335,063	9,00	149
		84,70	190	335,063	9,00	163
	54	73,00	110	578,745	10,00	227
		71,00	110	578,745	10,00	229
	58	70,00	250	254,648	6,50	210
		70,00	250	254,648	6,50	201
	62	75,00	100	636,620	7,00	245
		62,00	100	636,620	7,00	199
	66	50,00	100	636,620	7,00	214
		51,05	100	636,620	7,00	257
	70	55,00	100	636,620	7,00	194
		58,50	100	636,620	7,00	71
	74	63,35	200	318,310	6,60	176
		64,00	200	318,310	6,60	112
	78	55,00	180	353,678	6,00	193
		56,00	180	353,678	6,00	167
	82	42,00	70	909,457	8,20	130
		44,00	70	909,457	8,20	63
S.S. 166	7	49,00	40	1591,486	8,30	96
		47,75	40	1591,486	8,30	104
	12	49,75	150	424,399	7,16	116
		63,00	150	424,399	7,16	116
	17	49,15	130	489,724	6,40	40
		59,00	130	489,724	6,40	44
	20	46,00	75	846,163	6,30	43
		44,70	75	846,163	6,30	55
	30	58,00	300	212,246	6,20	38
		60,90	300	212,246	6,20	38
	33	43,50	50	1273,113	6,50	21
		48,00	50	1273,113	6,50	31
	36	45,75	35	1818,753	5,90	36
		42,10	35	1818,753	5,90	24
	39	38,25	35	1818,639	5,70	26
		39,30	35	1818,639	5,70	39
	42	50,90	75	848,837	6,00	35
		58,00	75	848,837	6,00	39
	47	41,00	45	1414,668	5,90	37
		45,00	45	1414,668	5,90	33
	50	46,00	55	1157,497	5,80	29
		50,30	55	1157,497	5,80	39
	53	51,30	50	1273,243	6,25	27
		48,00	50	1273,243	6,25	23

Strada	Sezione	V_{85C} [km/h]	R [m]	CCRs [gon/km]	Larghezza carreggiata [m]	numerosità del campione
S.S. 103	56	43,15	50	1273,232	5,80	40
		42,10	50	1273,232	5,80	34
	59	52,00	150	424,409	6,30	24
		70,00	150	424,409	6,30	26
	62	41,00	35	1818,892	6,30	29
		45,00	35	1818,892	6,30	39
	66	47,00	75	848,817	6,40	16
		48,15	75	848,817	6,40	20
	69	51,75	100	636,605	6,00	20
		54,00	100	636,605	6,00	21
	72	42,35	45	1414,907	6,00	32
		44,60	45	1414,907	6,00	37
	75	54,85	90	707,357	5,70	30
		55,30	90	707,357	5,70	24
	80	58,00	135	471,572	5,65	34
		64,00	135	471,572	5,65	33
	85	56,10	100	636,556	6,00	34
		50,60	100	636,556	6,00	27
	89	39,80	45	1414,716	5,80	25
		45,00	45	1414,716	5,80	19
	92	40,00	38	1675,334	5,60	21
		45,00	38	1675,334	5,60	21
	98	46,60	110	578,746	5,40	38
		48,00	110	578,746	5,40	29
	31	64,10	250	27,7778	6,55	222
		73,00	250	27,7778	6,55	172
	34	59,00	60	-38,8889	7,25	189
		74,00	60	-38,8889	7,25	147
	36	53,00	90	71,1111	6,50	211
		52,20	90	71,1111	6,50	172
	38	62,00	130	-37,7778	6,70	335
		58,00	130	-37,7778	6,70	300
	41	54,50	80	20,0000	7,10	149
		67,75	80	20,0000	7,10	124
	42	59,10	85	-30,0000	6,70	200
		56,75	85	-30,0000	6,70	179
	44	66,00	80	-24,4444	7,05	173
		69,80	80	-24,4444	7,05	162
	45	64,00	110	58,8889	6,90	162
		72,60	110	58,8889	6,90	162
	47	68,00	100	-6,6667	7,35	214
		75,75	100	-6,6667	7,35	166
	48	65,00	200	10,0000	6,70	340
		71,00	200	10,0000	6,70	330
	49	63,00	100	-30,0000	7,28	137
		68,00	100	-30,0000	7,28	166

Strada	Sezione	V_{85C} [km/h]	R [m]	CCRs [gon/km]	Larghezza carreggiata [m]	numerosità del campione
	50	67,90	150	22,2222	6,98	144
		63,00	150	22,2222	6,98	167
	53	48,00	60	-76,6667	10,80	386
		51,00	60	-76,6667	10,80	325
	55	59,00	100	53,3333	9,03	139
		56,30	100	53,3333	9,03	143
	56	86,00	350	23,3333	9,51	200
		88,00	350	23,3333	9,51	156
	77	55,00	60	58,8889	7,36	192
		54,00	60	58,8889	7,36	185
	80	66,00	90	-22,2222	7,65	211
		59,00	90	-22,2222	7,65	170
	84	63,00	80	76,6667	6,38	264
		64,00	80	76,6667	6,38	218
	86	73,00	150	26,6667	6,17	235
		80,35	150	26,6667	6,17	224
	90	62,00	80	67,7778	6,17	225
		59,00	80	67,7778	6,17	214
	93	59,00	70	-71,1111	6,18	541
		60,00	70	-71,1111	6,18	493
	96	53,00	45	77,7778	6,16	262
		53,00	45	77,7778	6,16	260
	99	61,70	90	-68,8889	6,59	241
		60,35	90	-68,8889	6,59	215
S.P. 135	6	66,00	150	18,0000	6,00	534
		76,00	150	18,0000	6,00	493
	16	70,00	250	-18,0000	5,90	429
		76,00	250	-18,0000	5,90	377
	22	82,00	320	10,0000	5,87	569
		81,00	320	10,0000	5,87	452
	43	69,00	500	12,0000	6,40	946
		73,30	500	12,0000	6,40	590

Tabella 13 Base di Dati per i Rettifili (48 Rettifili, 73 Sezioni Campionarie).

Strada	Sezione	V_{85T} [km/h]	L_T [m]	Sezione Curva precedente	V_{85Cp} [km/h]	R_{Cp} [m]	Larghezza Carreggiata [m]	Densità accessi per Km
S.P. 30 B	14	88,80	309	18	64,00	280	7,5	1,0
	20	57,00	215	18	59,05	280	5,0	0,0
	20	68,00	215	21	90,30	200	5,0	0,0
	22	81,00	342	21	78,00	200	5,0	0,6
	24	95,65	288	25	82,30	2000	5,0	1,0
	26	88,75	308	25	86,20	2000	5,0	1,0
S.P. 52	24	75,75	630	19	35,00	55	5,9	1,6
	47	64,00	166	49	61,75	100	7,7	1,2
	51	68,05	71	49	65,00	100	8,3	2,8
	51	66,00	71	53	70,30	400	8,3	2,8
	55	86,45	367	53	72,80	400	7,0	3,0
	58	73,95	367	60	81,00	2000	7,0	3,0
S.P. 312	11	68,80	73	9	67,00	145	7,5	0,0
	52	61,00	622	55	44,60	50	5,0	0,8
	59	72,00	492	55	41,00	50	5,0	0,8
	60	73,00	492	62	71,00	600	5,0	0,8
	66	73,00	138	64	69,70	300	5,0	0,0
	66	69,00	138	68	69,00	100	5,0	0,0
	70	71,00	82	68	64,00	100	5,0	0,0
	70	73,00	82	72	71,00	900	5,0	0,0
S.S.426	6	69,00	183	4	50,00	90	6,5	1,1
	6	64,00	183	10	45,00	60	6,5	1,1
	14	80,00	502	10	50,00	60	7,0	0,6
	15	90,85	502	18	82,80	450	7,0	0,6
	22	89,00	166	18	80,00	450	6,5	0,6
	21	94,00	166	24	91,60	250	6,5	0,6
	29	96,00	724	24	68,00	250	7,0	0,6
	27	94,15	724	34	78,00	400	7,0	0,6
	39	88,00	428	34	75,00	400	7,0	0,9
	39	84,60	428	41	74,00	240	7,0	0,9
	45	82,00	283	41	67,80	240	7,0	1,1
	44	87,50	283	47	83,00	150	7,0	1,1
	49	81,35	121	47	80,75	150	7,7	0,0
	49	78,60	121	51	84,70	190	7,7	0,0
	60	70,00	72	58	70,00	250	7,0	1,4
	60	64,00	72	62	62,00	100	7,0	1,4
	64	63,00	101	66	51,05	100	7,0	1,0
	76	68,80	74	74	63,35	200	6,3	1,4
	76	59,45	74	78	56,00	180	6,3	1,4
	80	54,00	55	78	55,00	180	7,0	3,6
	80	52,00	55	82	44,00	70	7,0	3,6
S.S. 166	5	59,00	73	7	47,75	40	6,4	0,0
	9	48,00	51	7	49,00	40	7,9	19,7
	10	52,00	65	12	63,00	150	6,9	0,0

Strada	Sezione	V_{85T} [km/h]	L_T [m]	Sezione Curva precedente	V_{85Cp} [km/h]	R_{Cp} [m]	Larghezza Carreggiata [m]	Densità accessi per Km
	14	51,00	61	12	49,75	150	8,4	0,0
	15	50,15	99	17	59,00	130	6,8	0,0
	64	51,00	76	62	41,00	35	6,0	0,0
	64	51,00	76	66	48,15	75	6,0	0,0
	77	64,90	113	75	54,85	90	5,9	8,8
	78	60,10	97	80	64,00	135	6,0	0,0
	82	71,00	128	80	58,00	135	6,3	0,0
	83	65,95	193	85	50,60	100	5,8	5,2
	87	59,00	50	85	56,10	100	6,2	0,0
S.S. 103	40	71,00	90	41	54,5	80	6,98	0,0
	43	71,00	48	42	56,75	85	6,6	0,0
	43	66,00	48	44	66	80	6,6	0,0
	51	79,10	143	50	63	150	6,99	1,0
	51	66,65	143	53	48	60	6,99	1,0
	82	77,10	366	80	59	90	6,94	1,4
	88	79,6	182	86	80,35	150	6,16	1,4
	88	71	182	90	62	80	6,16	1,4
S.P. 135	1	78,05	502	6	76,00	150	5,7	2,0
	1	74,00	502	-	-	-	5,7	2,0
	11	72,10	478	16	76,00	250	5,44	2,0
	11	59,80	478	6	66,00	150	5,44	2,0
	21	80,00	715	22	81,00	320	5,6	2,0
	21	76,00	715	16	70,00	250	5,6	2,0
	24	85,00	351	31	75,00	300	6	2,0
	24	77,00	351	22	82,00	320	6	2,0
	38	90,00	1082	43	73,30	500	6,05	2,0
	39	83,00	1082	31	69,00	300	5,75	2,0
	50	77,75	490	-	-	-	6,13	2,0
	50	69,00	490	43	69,00	500	6,1	2,0

Il comportamento di guida dell'utente e le scelte che questi opera in base alle caratteristiche della strada ed alla propria percezione della stessa, sono dovuti al concorso di numerosi fattori, non sempre di immediata identificazione né sempre direttamente misurabili.

La velocità di percorrenza rappresenta uno degli indicatori più forti nella descrizione del rapporto uomo-strada; la sua conoscenza consente di compiere delle scelte di carattere progettuale (per strade di nuova esecuzione) ovvero riguardanti la trasformazione dell'esistente.

Nell'ambito del trasporto stradale dunque, lo studio del fenomeno della distribuzione delle velocità e delle sue possibili rappresentazioni, riveste notevole interesse, riuscendo a captare l'attenzione dei ricercatori in questo specifico settore.

In molti campi della scienza, la simulazione di un fenomeno può essere ottenuta attraverso un modello, ossia un paradigma formale in grado di sostituire il contenuto informativo di una sequenza di eventi osservati con una "formula abbreviata" avente un contenuto informativo identico; se il modello è anche previsionale, esso consente inoltre di prevedere il contenuto informativo di altre sequenze di eventi della stessa natura.

Nella fattispecie, si è interessati alla messa a punto di modelli che simulino in maniera adeguata il fenomeno delle velocità degli utenti stradali in una sezione o lungo un elemento di un tracciato stradale.

In realtà, essendo la natura di questa variabile intrinsecamente aleatoria, si punta alla conoscenza di un particolare valore della distribuzione delle velocità, cioè quello non superato da una percentuale di utenti: si assume pertanto la definizione di velocità operativa (85° percentile della distribuzione).

L'implementazione di un modello di velocità operativa è il risultato di una procedura che prevede le seguenti fasi:

- Specificazione dei modelli: individuazione delle variabili esplicative e definizione della sua forma funzionale, a partire dall'osservazione diretta del fenomeno reale;
- Taratura dei modelli: determinazione del valore dei suoi parametri.

Le elaborazioni svolte nel presente lavoro riguarderanno le suddette attività.

Per la specificazione dei modelli di velocità operativa si procederà, preliminarmente, ad un'analisi del campo di variabilità delle caratteristiche stradali in rapporto alle velocità operative, anche mediante diagrammi "a dispersione".

Dopodiché ci si avvale di relazioni rinvenute in letteratura scientifica di settore, sia per individuare le grandezze che maggiormente influiscono sul valore della variabile esaminata, sia per selezionare una o più relazioni funzionali che legano dette grandezze alla velocità operativa.

Fissata, pertanto, un'espressione analitica della velocità operativa in funzione di certe variabili esplicative, occorre tarare il modello determinando il valore dei parametri incogniti che compaiono nella funzione (ad esempio coefficienti moltiplicativi, esponenti, termini costanti, ecc...).

Questa operazione di calibrazione viene effettuata attraverso una regressione sui dati sperimentali delle velocità operative monitorate e delle rispettive variabili indipendenti. Per la stima dei parametri è stato scelto il metodo dei minimi quadrati, applicato con l'utilizzo di codici di calcolo avanzati per l'analisi statistica e il data processing, che consentono di eseguire la suddetta valutazione a partire da un insieme di dati sperimentali preventivamente importati e dall'indicazione delle funzioni analitiche di riferimento, i cui coefficienti inizialmente "muti" sono i valori incogniti del problema. L'elaborazione consiste in una regressione non lineare, basata sul metodo dei minimi quadrati e condotta secondo l'algoritmo proposto da Levenberg (1944) e Marquardt (1963), che rappresenta un perfezionamento del metodo di Gauss-Newton.

Il calcolo restituisce il coefficiente di determinazione ρ^2 , indicativo della bontà della regressione ed una tabella di riepilogo nella quale sono raccolte le principali informazioni statistiche relative ai parametri stimati.

Le grandezze riportate nelle tabelle di sommario sono di seguito riportate:

- ✓ *Estimate*: rappresenta il valore stimato per i parametri del modello corrente;
- ✓ *Standard Error*: è la deviazione standard della media della popolazione (definizione di Yule, 1897) ed è computata come:

$$Std.err = \sqrt{\frac{S^2}{n}}$$

dove: S^2 ed n sono rispettivamente varianza e numerosità campionarie;

- ✓ *t-value*: è il risultato del test di Student (T-test) eseguito sul campione delle misure: *df* (*degrees of freedom*) indica il numero di gradi di libertà associati;
- ✓ *p-level*: è la cosiddetta significatività statistica (espressione usata da Brownlee, 1960). Il livello di significatività (*level of significance*) costituisce una misura del grado in cui i risultati ottenuti possono ritenersi "veri", quindi rappresentativi della popolazione: 0,05 significa che esiste una probabilità del 5% di aver valori esterni all'intervallo di confidenza;
- ✓ *Lo. Conf Limit – Up. Conf Limit*: limiti inferiore (*lower*) e superiore (*upper*) dell'intervallo di confidenza. Con un assegnato livello di probabilità (ad esempio 95%) i valori dei parametri stimati sono veri: le quantità riportate sotto la voce "estimate" rappresentano la media aritmetica di questi limiti.

Il procedimento serve per stabilire le relazioni di dipendenza tra le velocità operative e le variabili geometriche e non che caratterizzano gli elementi stradali. Una delle componenti che caratterizzano il rapporto uomo-strada è senz'altro quella legata all'ambiente attraversato. Alcuni autori ritengono che l'adozione di parametri capaci di rappresentare la variabile "ambiente", d'interpretare gli effetti legati ai fattori topografici, climatici e contestuali che differenziano le singole infrastrutture, consenta di spiegare la varianza delle velocità operative sui diversi elementi della strada. Uno di questi parametri è la *velocità ambientale*, o che dir si voglia *velocità desiderata*. È valutata come la massima delle velocità operative V_{85} rilevate su lunghi rettifili o curve di ampio raggio associata ad un tratto omogeneo di strada; la sua introduzione come variabile indipendente nei modelli di velocità operativa, mira ad aumentare le capacità previsionali dei modelli stessi.

Per le strade oggetto d'indagine la velocità ambientale può essere calcolata attraverso i dati dei rilievi sperimentali, previa definizione dei tronchi omogenei che compongono i tracciati secondo le indicazioni espresse, che portano alla suddivisione in tratti aventi caratteristiche geometriche omogenee ed uniformi. La principale grandezza geometrica di riferimento di non difficile determinazione è il *CCR* medio del tronco. Sulle 8 strade monitorate si identificano così 12 tronchi omogenei aventi *CCR* variabili tra 9,6 e 589,3 gon/km.

Dall'esame dello stato dell'arte in tema di velocità ambientale, risultano ancora pochi i modelli proposti a livello internazionale. Tra le relazioni esistenti vi è quella implementata dal gruppo di ricerca dell'Università di Trieste:

$$V_{amb} = 210,83 \cdot CCR^{-0,17} \quad (\rho^2 = 0,85)$$

L'espressione trovata dai ricercatori di Trieste assume come unica variabile esplicativa della velocità ambientale il tasso di variazione medio della curvatura del tronco omogeneo.

Recentemente, hanno proposto una formulazione lievemente differente:

$$V_{des} = 123,54 - 2,79 \cdot CCR^{-0,47} \quad (\rho^2 = 0,76)$$

Molto simile alla precedente, ma ottenuta da un campione di dimensioni maggiori, comprendente 23 tronchi omogenei.

Un primo tentativo di ricerca di un modello tarato sui dati raccolti nel corso del presente lavoro ha portato alla definizione di una funzione di tipo bilineare, che utilizza come variabile indipendente anche la larghezza della corsia:

$$V_{amb} = 82,84 - 0,1033 \cdot CCR + 3,44 \cdot L_c \quad (\rho^2 = 0,84)$$

Questi modelli costituiscono il riferimento per le successive analisi di regressione sui dati delle velocità ambientali rilevate sperimentalmente.

La messa a punto di un modello di V_{amb} consiste nel correlare le caratteristiche dei tronchi omogenei alla massima velocità realizzata sui tratti stessi da un campione rappresentativo di utenti (85° percentile). La specificazione del modello avviene attraverso la scelta di un'appropriata relazione matematica.

Nel caso in esame è anche possibile verificare come la linea di tendenza è sia una retta che una parabola, individuando una relazione lineare o quadratica.

In conformità a quanto riportato in letteratura e quanto ottenuto in vari tentativi si è deciso in primo luogo di procedere con una regressione sui dati utilizzando una relazione formalmente identica a quella in precedenza utilizzata, ossia una funzione potenza del CCR . La taratura dei coefficienti porta alla seguente espressione:

$$V_{env} = 121,86 \cdot CCR^{-0,07} \quad (\rho^2 = 0,69)$$

Tabella 14 Modelli di V_{amb} : Stima dei parametri.

Model is: $V3=a1 \cdot V4^{a2}$ (Vamb_dati_sperimentali)						
Dep. Var. : V_{amb} [km/h] Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 5	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a1	121.86	9.286	13.122	0.000	100.85	142.86
a2	-0.07461	0.0164	-4.540	0.001	-0.11	-0.03

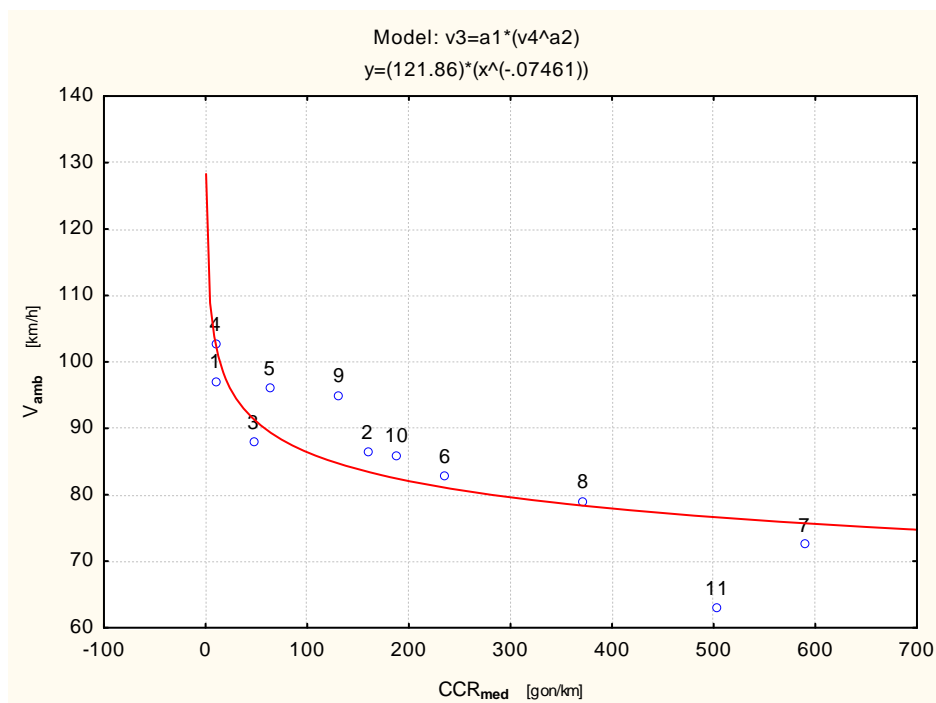


Figura 24 Modelli di V_{amb} : Regressione potenza.

Utilizzando invece una funzione lineare:

$$V_{env} = a_0 + a_1 \cdot CCR$$

La calibrazione fornisce il seguente modello:

$$V_{env} = 97.491 - 0.05363 \cdot CCR \quad (\rho^2 = 0,84)$$

Tra i modelli di previsione delle velocità ambientali aventi coefficienti stimati tutti statisticamente significativi al 95% con $p\text{-level} < 0,05$, quest'ultimo modello fornisce il più alto grado di correlazione. I dettagli dei parametri di regressione sono riportati nella seguente tabella, mentre la funzione è diagrammata in figura 4.4. Il grafico mostra come la curva interpoli molto bene i dati sperimentali.

Tabella 15 Modello V_{amb} : Stima dei parametri.

Model is: $V_{amb} = a_0 + a_1 \cdot CCR$						
Dep. Var. : V_{amb} [km/h] Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 5	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	97.49169	2.231751	43.68395	0.000000	92.44312	102.5403
a1	-0.05363	0.007897	-6.79124	0.000080	-0.07150	-0.0358

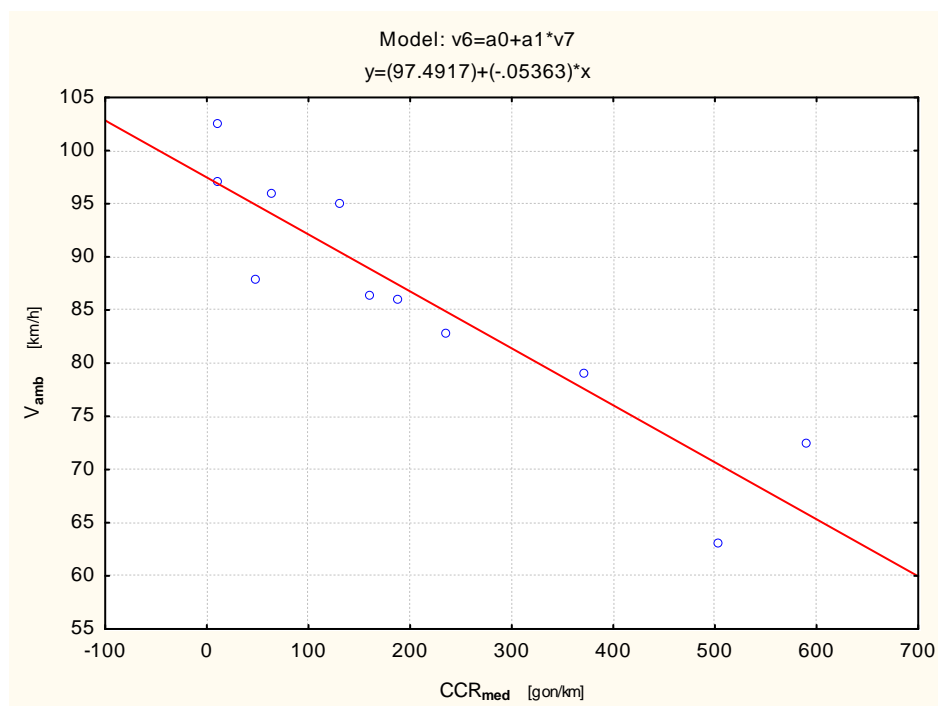


Figura 25 Modelli di V_{amb} : Regressione lineare.

Il modello mostra come la retta interpoli molto bene i dati sperimentali, infittendo i limiti del CCR tra 131,27 e 503,17 gon/km, grazie all'introduzione di 4 ulteriori tronchi omogenei. È stato ricavato da misure eseguite su strade extraurbane ad accessibilità diffusa, i cui tronchi hanno

tortuosità media variabile tra 9,601 e 589,264 gon/km e sui quali si realizzano velocità non superiori ai 103 km/h. Pertanto, esso può essere applicato alle infrastrutture aventi proprietà analoghe o anche a strade che presentano caratteristiche differenti.

Considerando l'intero database a disposizione raccolto in questi anni nelle fasi operative del presente lavoro di ricerca si ottiene un modello della stessa forma analitica, ma con un coefficiente di spiegazione lievemente più piccolo.

La forma analitica del modello di velocità ambientale sul tronco omogeneo è:

$$V_{env} = a_0 + a_1 \cdot CCR$$

La taratura dei coefficienti del modello porta alla seguente espressione analitica:

$$V_{env} = 97.8514 - 0.05191 \cdot CCR \quad (\rho^2 = 0,78)$$

La stima dei parametri di regressione della funzione è consegnata nella seguente tabella:

Tabella 16 Modello V_{amb} : Stima dei parametri.

Model is: $V_{amb}=a_0+a_1 \cdot CCR$						
Dep. Var. : V_{amb} [km/h] Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 5	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	97.85145	2.406287	40.66492	0.000000	92.48990	103.2130
a1	-0.05191	0.008469	-6.12885	0.000111	-0.07078	-0.0330

La forma grafica del modello è riportata nella seguente figura:

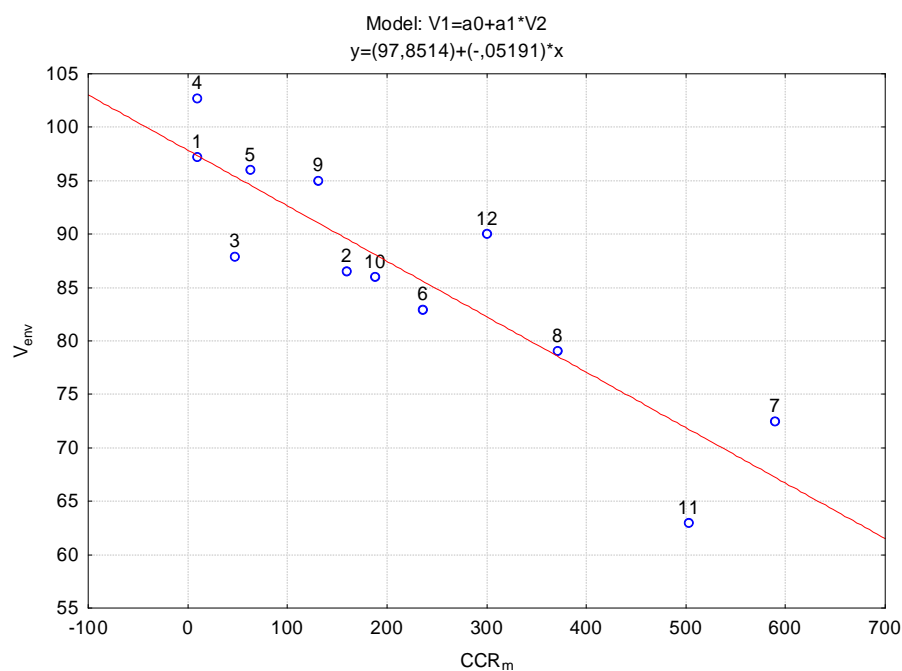


Figura 26 Modello V_{amb} : Regressione lineare.

Il seguente grafico riporta i valori normali attesi in funzione dei valori residuali.

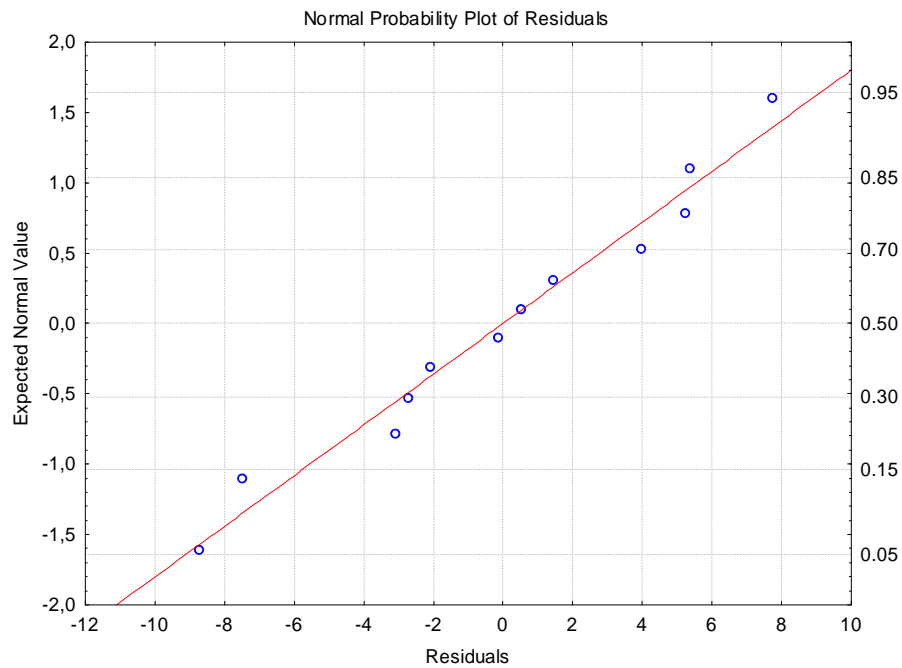


Figura 27 Modello V_{amb} : Valori normali attesi in funzione dei valori residuali.

Il seguente istogramma riporta la frequenza della distribuzione espressa come numero di osservazioni in funzione dei valori residuali.

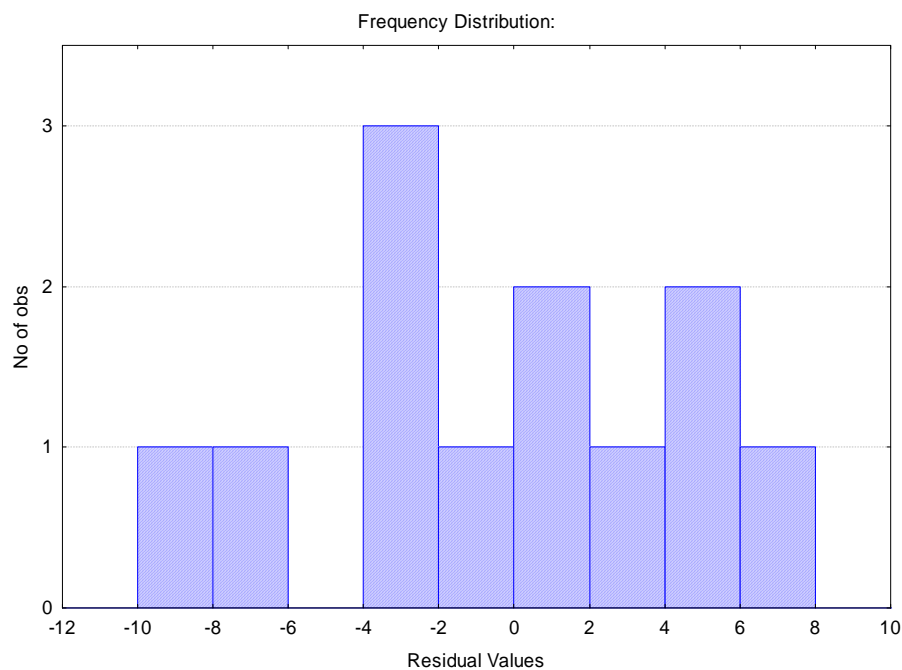


Figura 28 Modello V_{amb} : Valori normali attesi in funzione dei valori residuali.

Di seguito si riportano le correlazioni fra le variabili del modello.

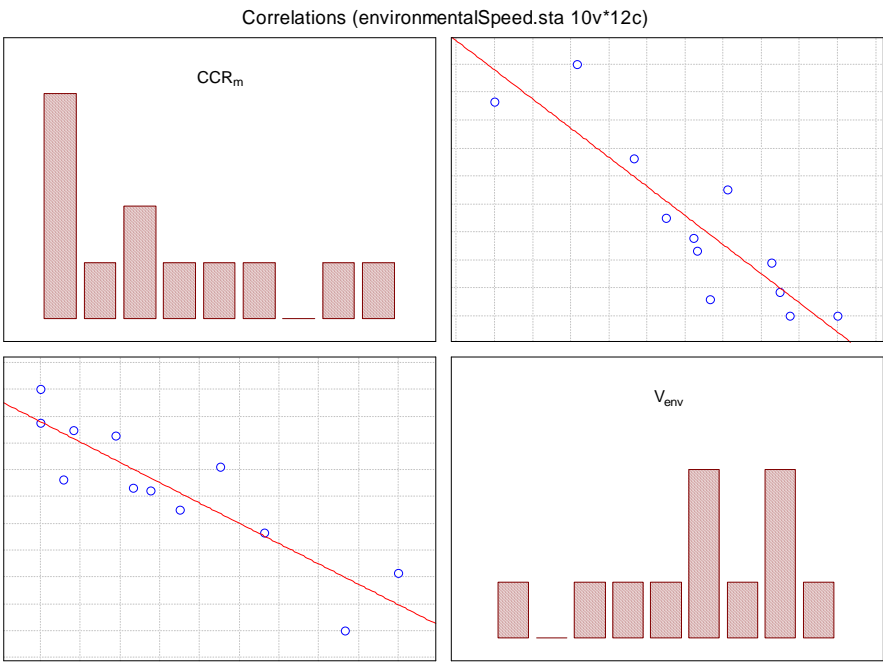


Figura 29 Modello V_{amb} : Correlazioni fra le variabili.

Per poter formulare delle ipotesi sulla dipendenza della velocità operativa in curva da parametri geometrici si esaminano preliminarmente i diagrammi a dispersione della variabile dipendente V_{85C} contro diverse grandezze: anzitutto, quelle rappresentative della curvatura $1/R$, CCR e il DC .

Plottando nella figura seguente i valori della velocità operativa in curva V_{85C} rilevata ed i CCR_S delle rispettive curve si nota che: la dispersione dei dati rilevati, sia in corrispondenza dei valori di CCR_S compresi tra 300 e 636 gon/km per raggi di curvatura variabili tra 100 e 200 m, sia in corrispondenza di valori bassi di CCR_S , evidenzia che l'utente è meno condizionato dal raggio di curvatura della curva percorsa.

Altri diagrammi a dispersione si possono ricavare separando i dati relativi alle velocità operative in curva in funzione dell'infrastruttura esaminata.

Inevitabili variazioni ed un'evidente dipendenza delle velocità rilevate dalla curvatura dell'elemento si evincono dall'esame dei diagrammi.

Pertanto, nel modello di V_{85C} si può ragionevolmente assumere un'espressione di primo tentativo che preveda un legame tra velocità operativa e tasso di variazione delle singole curve. Ad esempio si ipotizza una dipendenza di tipo lineare:

$$V_{85} = a_0 + a_1 \cdot CCR_S$$

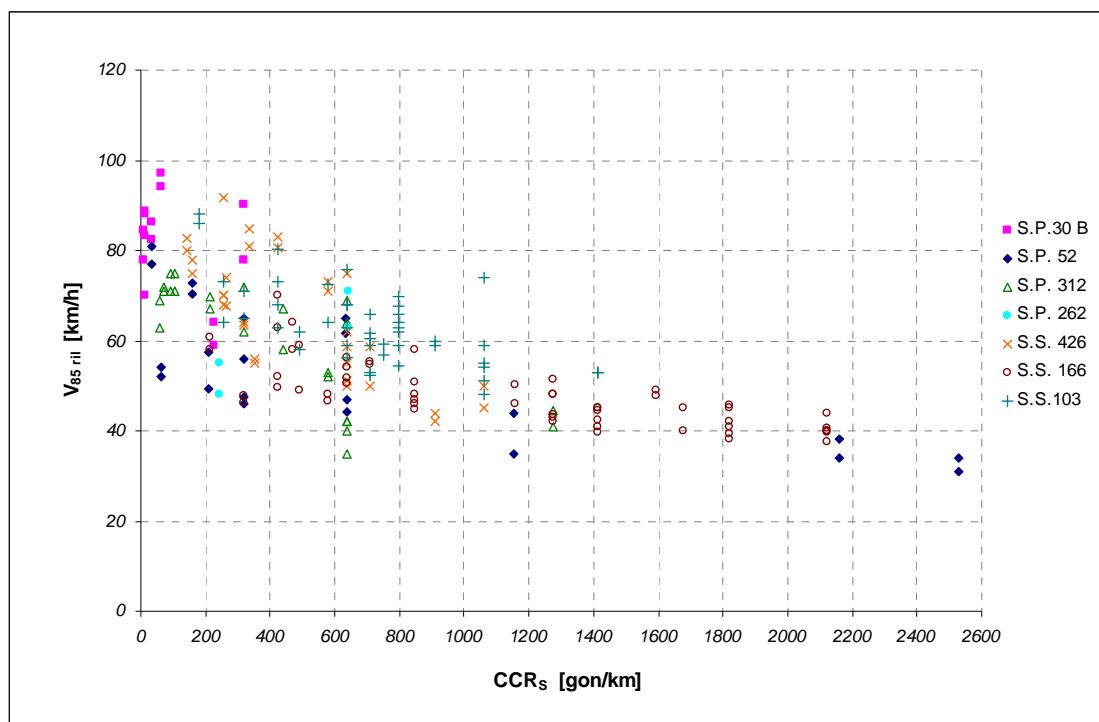


Figura 30 Diagramma a dispersione V_{85C} in funzione del CCR_S .

Il modello risulta il seguente:

$$V_{85C} = 74,88 - 0,020 \cdot CCR_S \quad (p^2 = 0,58)$$

In cui coefficienti presentano un *p-value* (livello di significatività statistica) inferiore al 5%. Conferma la forte dipendenza della V_{85C} dal CCR_S , sebbene l'adattamento della funzione ai dati campionari non sia particolarmente elevato.

Tabella 17 Modelli di V_{85C} : Stima dei parametri.

Model is: $V_2=a_0+a_1 \cdot V_4$						
Dep. Var.: V_{85C} [km/h]. Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 158	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	74.88	1.1583	64.64	0.00	72.593	77.169
a1	-0.020	0.0014	-14.78	0.00	-0.023	-0.018

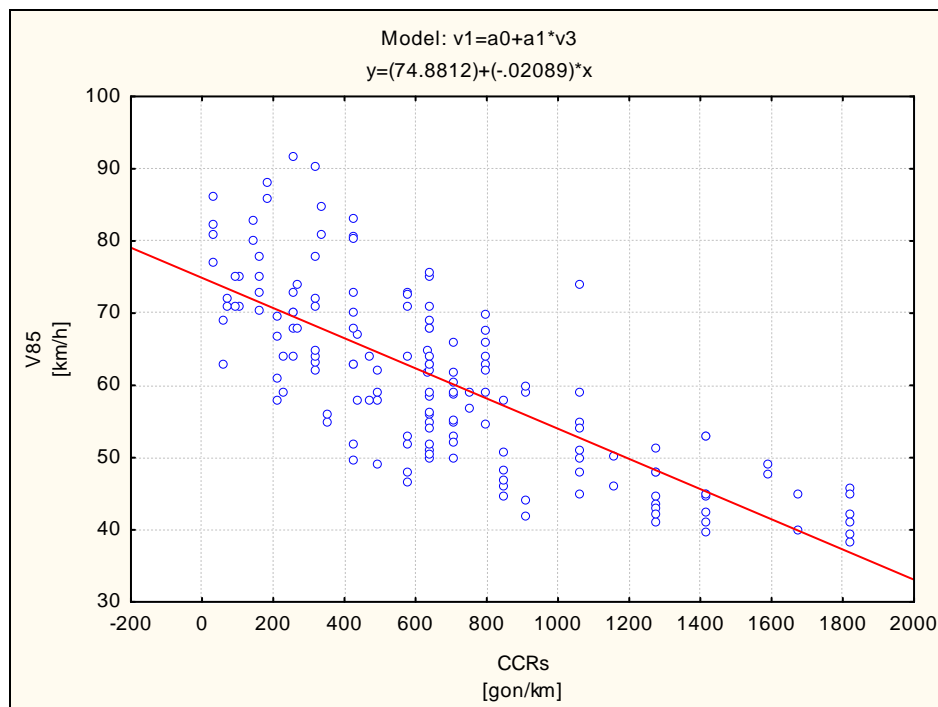


Figura 31 Modelli di V_{85C} : Regressione lineare semplice.

L'analisi correlativa mostra che un'altra variabile indipendente che ha buona correlazione all'85° percentile delle velocità è l'inverso della radice quadrata del raggio, si ha quindi la seguente relazione:

$$V_{85c} = a_0 - \frac{a_1}{\sqrt{R}}$$

Tabella 18 Modelli di V_{85C} : Stima dei parametri.

Model is: $V_1=a_0+a_1/(V_2^{0.5})$						
Dep. Var.: V_{85C} [km/h]. Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 158	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	87.31	1.748	49.926	0.000	83.861	90.766
a1	-272.54	17.132	-15.908	0.000	-306.375	-238.723

Il modello risulta:

$$V_{85c} = 87.31 - \frac{272.54}{\sqrt{R}} \quad (r^2 = 0,60)$$

L'inverso della radice quadrata del raggio è variabile utilizzata come variabile anche in altri modelli precedenti sviluppati, come il modello di Fitzpatrick et al. (2000).

Siccome una sola equazione non può descrivere adeguatamente l'influenza del tronco omogeneo, il database può essere suddiviso in diversi intervalli di CCR valutato nei tronchi omogenei ai quali le curve appartengono e le analisi sono state condotte separatamente per ogni gruppo.

Invece della velocità ambientale come McLean si preferisce utilizzare il CCR in quanto è una caratteristica geometrica, un'invariante della sezione stradale, non difficile da calcolare e non è valutata da altri modelli.

Sono stati esaminati differenti intervalli di CCR con l'obiettivo di limitare il numero degli intervalli ed allo stesso tempo di assicurare che l'equazione di regressione sviluppata per ciascun gruppo stimi la velocità operativa.

Quest'ultima è abbastanza differente dalla velocità operativa valutata dalle equazioni dei gruppi adiacenti per lo stesso raggio.

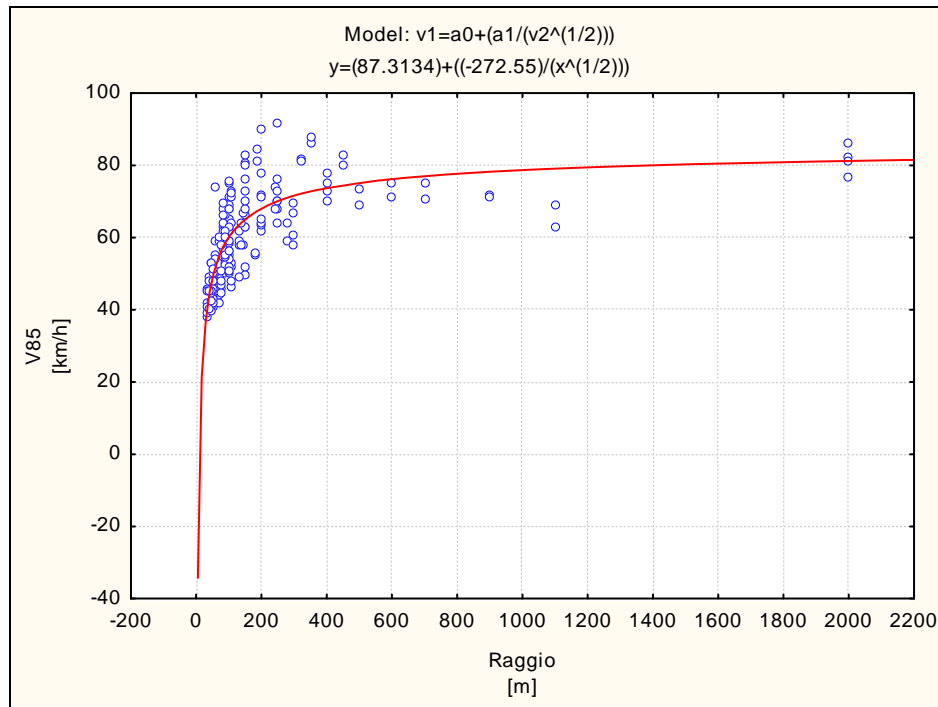


Figura 32 Modello di V_{85C} : Dipendenza dell'inverso della radice quadrata del raggio.

Il modello elaborato valuta quindi la velocità operativa in curva utilizzando quattro equazioni, ognuna delle quali si riferisce ad uno specifico intervallo di CCR differente ed è utilizzata per curve che appartengono ad una sezione stradale che ha il CCR ricadente nell'intervallo.

Tronchi omogenei con rettifili lunghi e curve con grande raggio che non influiscono significativamente con la velocità sono rappresentati dalla serie con valori di $CCR < 30$; mentre, tronchi omogenei con rettifili corti e curve di piccolo raggio che influiscono significativamente sulla velocità sono rappresentati dalla serie con valori di $CCR > 160$.

La velocità è condizionata maggiormente da un CCR elevato, da raggi piccoli e rettifili corti, mentre lungo sezioni stradali con un CCR basso i conducenti possono scegliere liberamente la loro velocità.

Tabella 19 Equazioni di predizione della velocità operativa in curva.

N.	Intervallo di CCR	Intervallo di V_{amb}	Sezioni	Modelli	ρ^2
	[gon/km]	[km/h]		[km/h]	
1	< 30	97.15 - 102.65	8	$V_{85c} = 85,62 - \frac{180,26}{\sqrt{R}}$	0,21
2	30 – 80	87.9 – 96	44	$V_{85c} = 87,74 - \frac{268,17}{\sqrt{R}}$	0,4636
3	80 – 160	86.45	8	$V_{85c} = 87,14 - \frac{211,09}{\sqrt{R}}$	0,4384
4	> 160	63 – 95	108	$V_{85c} = 82,36 - \frac{235,70}{\sqrt{R}}$	0,4653

Tabella 20 V_{85} in curva dipendente dall'inverso della radice quadrata del R.

Equazione	Parametri regressione		ρ^2	<i>p-level</i>	
	a_0	a_1		p_0	p_1
$V_{85} = a_0 + a_1 / (R^{0,5})$	85.62	-180.26	0.21	0,000	0,252
	87,74	-268,17	0,46	0,000	0,000
	87,14	-211,09	0,44	0,000	0,073
	82,36	-235,70	0,47	0,000	0,000

Esaminando i risultati delle elaborazioni per i diversi modelli proposti si può cogliere, da un lato, la significatività delle variabili legate al raggio dell'elemento curvilineo e, dall'altro, il valore non troppo elevato del grado di correlazione: le velocità rilevate lungo le curve non sono facilmente spiegabili dalla sola variazione della curvatura, che comunque si dimostra una variabile predittiva corretta.

Per aumentare le capacità previsionali dei modelli analizzati in precedenza si introduce la velocità ambientale; in particolare, si prende in considerazione il modello che utilizza l'espressione lineare e quadratica della curvatura con l'aggiunta di una ulteriore variabile indipendente:

$$V_{85} = a_0 + a_1 \cdot (1/R) + a_2 \cdot (1/R)^2 + a_3 \cdot V_{amb}$$

Quindi a partire dai risultati ottenuti in precedenza si ritengono i coefficienti del modello compreso il nuovo della nuova variabile.

Il motivo di un adattamento così basso dei modelli teorici ai dati sperimentali va ricercato nella notevole dispersione nelle distribuzioni campionarie delle velocità rilevate.

Questa eventualità, ampiamente riscontrata anche in analoghe sperimentazioni soprattutto nelle curve di raggio ampio (bassi valori della curvatura), può essere interpretata considerando che il

comportamento dell'utente che percorre la curva è condizionato sia dalle caratteristiche geometriche dello sviluppo planimetrico del tracciato – in termini di percezione del comfort e dell'aderenza impegnata –, che da una serie di numerosi altri fattori (larghezza corsia, allargamento in curva, presenza di transizioni, presenza di ostacoli laterali, visuali libere, stato della pavimentazione, ecc...) difficili da rilevare e classificare in maniera esaustiva.

Quando si percorrono curve a curvatura elevata il fattore più vincolante per la scelta della velocità da operare risulta senza dubbio la geometria; in tal caso, due curve distinte ma di raggio simile dovrebbero condurre a distribuzioni campionarie di velocità mai troppo diverse, in quanto l'elevata curvatura riduce le singolarità che caratterizzano e differenziano ciascuna curva dall'altra.

Viceversa, nel caso delle curve poste in tronchi di strada dall'andamento planimetrico con valore di curvatura più basso, l'influenza di tutti i fattori “secondari”, geometrici e non, diviene maggiore; per cui, considerando due curve di raggio simile, si riscontrano spesso differenze evidenti nei parametri rappresentativi delle distribuzioni rilevate, che rispecchiano una diversità effettiva fra le due curve in esame. Tale diversità nasce, come premesso, dalla concomitanza di fattori, non tutti noti e classificabili, alcuni dei quali riferibili alla geometria dello sviluppo planimetrico del tracciato e, come tali, rilevabili.

Nella velocità ambientale si è riconosciuto uno dei possibili “fattori secondari” di carattere geometrico. Altre esperienze eseguite su tronchi stradali caratterizzati da tortuosità medio-bassa, hanno evidenziato, per le velocità operative lungo le curve, una dipendenza dalla curvatura della curva che precede, anche quando tra le due sia interposto un rettilineo, purché “dipendente”. Si giunge all'implementazione di un modello con un maggior numero di variabili ma che, in definitiva, non apporta significativi miglioramenti ai risultati già ottenuti.

Alcuni dei modelli rilevati in letteratura considerano diverse altre variabili, quali la pendenza trasversale o la distanza di visibilità. L'orientamento del presente lavoro di ricerca è rivolto verso formulazioni caratterizzate da poche grandezze facilmente determinabili e quindi da una sostanziale semplicità formale che le renda di pratico utilizzo da parte degli enti gestori delle infrastrutture viarie.

I rilievi sperimentali mostrano sempre un andamento molto fluttuante delle velocità operative nei confronti della curvatura. Questo comportamento, sulle cui cause si è largamente dibattuto, contribuisce ad accentuare la natura aleatoria del fenomeno.

Ciò nonostante, può accadere che particolari “situazioni locali” che si verificano nell'intorno di un sito di rilevamento, inducano dei condizionamenti sistematici sui comportamenti di guida. Ove tali influenze non vengano considerate, i valori di velocità che si traggono dal monitoraggio della

sezione potrebbero risultare molto diversi da quelli previsti, non per l'intrinseca casualità della variabile, ma perché viziati da una condizione che non rientra nelle ipotesi di lavoro. Un caso tipico si presenta, ad esempio, se la sezione di rilevamento si trova in prossimità di un'intersezione: è presumibile che gli utenti tenderanno a moderare il proprio andamento, ed i valori della velocità potrebbero risultare di molto inferiori rispetto a quelli che si verificano su un elemento avente le medesime caratteristiche geometriche.

In definitiva, l'aver accettato *in toto* le distribuzioni di velocità risultanti dai rilievi sperimentali rientra tra le possibili cause dell'elevata varianza dei dati campionari. In quest'ottica, si è ritenuto di dover operare una revisione accurata degli archivi disponibili al fine di ottenere delle regressioni più efficaci sui dati raccolti. La definizione dei criteri di esclusione dei valori di velocità operative da elaborare dovrà risultare oggettiva il più possibile, in maniera tale da garantire una base dati corretta, ossia più coerente con le ipotesi che stanno alla base dello studio, senza alterarne "artificiosamente" la consistenza. Per individuare tali criteri ci si avvale anche delle indicazioni fornite dai modelli "di tentativo" precedentemente effettuate. Mettendo a confronto, per ciascuna strada, le velocità operative rilevate con quelle calcolate con uno dei modelli di regressione suddetti, si valuta di quanto il modello "scarta" la stima delle velocità operative in curva.

La velocità operativa in curva dipende anche dalla velocità ambientale e quindi tiene conto dell'influenza dell'ambiente stradale attraversato sul comportamento di guida, elevando il coefficiente di determinazione. Si possono individuare i punti campionari che stanno "troppo in alto" o "troppo in basso" rispetto al modello: il problema è stato (volutamente) ribaltato, in quanto si considera valido il modello dove s'individuano i punti che se ne discostano eccessivamente; le sezioni cui questi valori si riferiscono, sono stati oggetto di ulteriori indagini.

Tutte le osservazioni e le informazioni aggiuntive raccolte, hanno portato alla formulazione dei seguenti criteri di esclusione per le sezioni campionarie di centro curva:

- *Raggi superiori a 2187 m.* Raggi molto ampi non condizionano il comportamento di guida. Su tali curve i conducenti, in condizioni di flusso libero, non decelerano o addirittura tendono ad accelerare: la curva può essere più facilmente "tagliata" mantenendo invariata la traiettoria. In mancanza di altre indicazioni sperimentali, è stato scelto il valore $R^* = 2187$ m che corrisponde all'ampiezza per cui – nelle strade con $V_{pmax} = 100$ km/h, extraurbane secondarie – la normativa prevede la sopraelevazione minima pari al 2,5%. In alternativa si potrebbe adottare il valore $R' = 5250$ m per cui la normativa prevede la sagoma in contropendenza. Il valore $R^* = 2187$ m tuttavia sembra già sufficientemente elevato, come dimostrano alcuni studi sulle zone di transizione

secondo i quali, per raggi superiori, la decelerazione assume valori irrilevanti ($< 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^2$).

- *Raggi inferiori a 35 m.* Questa condizione è imposta da un'incongruenza riscontrata nel modello. Dopo i primi tentativi, atteso che il modello che meglio si adattava ai dati era la funzione quadratica della curvatura e lineare della V_{amb} , si è visto che tale corrispondenza era crescente solo per $R > 32 \text{ m}$: in altri termini, per $R < 32 \text{ m}$ la funzione presenta il paradosso che al diminuire del raggio la V_{85} aumenta. Tale valore si può calcolare in forma rigorosa attraverso la derivata parziale della funzione rispetto al

$$R: \quad \frac{\partial V_{85}}{\partial R} = -a_1 \cdot \frac{1}{R^2} - 2a_2 \cdot \frac{1}{R^3}, \quad \text{e} \quad \text{ponendo:} \quad \frac{1}{R} = y \quad \text{si può scrivere:}$$

$$\frac{\partial V_{85}}{\partial R} = -a_1 y^2 - 2a_2 y^3$$

. Per la determinazione del punto di minimo della funzione rispetto alla variabile R , basta trovare gli zeri non nulli della su scritta derivata:

$$\frac{\partial V_{85}}{\partial R} = y^2 \cdot (-a_1 - 2a_2 y) = 0 \quad \rightarrow \quad y = -\frac{a_1}{2a_2} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{1}{y} = -\frac{2a_2}{a_1} = 32,08 \text{ m}$$

. Come limite

inferiore del raggio si assume il valore 35 m che, a regressione ultimata, dovrà essere

$$V_{85} = V_{85} \left(\frac{1}{R}, V_{amb} \right)$$

non inferiore al punto di minimo della:

Tempo di percorrenza della curva, alla velocità operativa rilevata nella sezione centrale, inferiore a 2,5 secondi. Lo scopo è quello di escludere le curve che non vengono “percepite come tali”. La condizione per cui l’arco di curva deve avere una lunghezza minima tale da essere percorso in almeno 2,5 s è mutuata alla normativa che peraltro considera come velocità di percorrenza il valore minimo dell’intervallo di velocità di progetto. Quello che rappresenta una regola di “buona progettazione” può diventare criticabile se usato come metodo di “selezione” delle sezioni campionarie. Esso ridurrebbe di molto il database senza fornire, peraltro, motivazioni convincenti: non si può affermare, infatti, che il tempo di 2,5 s distingua esattamente le curve percepite dagli utenti come tali da quelle che non lo sono a meno che non si riesca ad individuare un’evidente situazione geometrica che rende l’arco di curva inequivocabilmente assimilabile ad un tratto pseudo - rettilineo: ad esempio, se l’arco è corto, con ampio raggio ed interposto tra due rettifili, l’utente tenderà a “tagliarlo”, mantenendo la velocità che aveva in rettilineo. In tal senso la condizione $t < 2,5 \text{ s}$ serve soltanto come indicatore di massima, grazie al quale si individuano delle particolari sezioni di centro curva che poi andranno

analizzate più nel dettaglio attraverso l'esame della cartografia di riferimento ed il rilievo strumentale diretto. L'indicatore è più consistente se la velocità operativa rilevata è “molto maggiore” di quella da modello: $V_{85ril} - V_{85mod} \geq 12 \text{ km/h}$. Tale differenza, sia pure di segno opposto, sarà chiarita dalla seguente condizione.

- *Differenza tra V_{85} da modello e V_{85} rilevata maggiore di 12 km/h.* Se una velocità operativa campionaria è di molto inferiore a quella prevista dal modello, vi sono due possibili spiegazioni: o il modello, in quel caso, sovrastima il valore della velocità operativa (e quindi c'è un difetto di previsione del modello); oppure può esistere un “fattore locale” che abbassa il valore di velocità operativa nella specifica sezione rispetto a quello che si avrebbe in condizioni di flusso libero. In quest'ottica, la differenza tra la velocità operativa prevista dal modello e quella ottenuta dai dati sperimentali si può solo considerare come un indicatore di massima, nel senso già chiarito in precedenza: un certo valore si escluderà soltanto se tale scostamento risulta effettivamente motivato dalla presenza di locali condizionamenti geometrici (intersezioni, immissioni, restringimenti di carreggiata, ecc.) che rendono “più bassa” la velocità. Come valore di soglia della ΔV è stato scelto, in un intervallo variabile tra 10 e 15 km/h, quello di 12 km/h: ad esso corrisponde uno scostamento percentuale compreso tra 13 e 30% – ritenuto accettabile – quando la velocità varia tra 90 e 40 km/h (ad esempio se $V_{85ril} = 40 \text{ km/h}$ e la $V_{85mod} = V_{85ril} + 12 = 62 \text{ km/h}$, si ha $\Delta V_{85} = 100 \cdot (V_{85mod} - V_{85ril}) / V_{85ril} = 30\%$).

Dai controlli effettuati è risultato che per ben 55 sezioni campionarie sussistono le condizioni di esclusione. Ma, come si è cercato di spiegare, i suddetti criteri non devono essere considerati come rigide prescrizioni, potendo fungere anche soltanto da strumento “diagnostico” di riferimento per ulteriori indagini. In particolare, è necessario eseguire una verifica cartografica ed un riesame dei sopralluoghi, per accertare la presenza di “fattori geometrici e funzionali locali” che turbino la condizione di flusso ininterrotto, con notevole abbassamento delle velocità operative, cioè che determinino una mancata percezione dell'elemento, con notevole aumento delle velocità. In definitiva, risulta che 38 delle 55 sezioni focalizzate presentano valori ritenuti anomali con giustificata motivazione. Questa scoperta ha comportato l'aggiornamento del database in funzione del quale si eseguiranno le successive regressioni.

Durante la campagna di rilevamenti condotta nell'anno 2007, sulle 8 strade oggetto d'indagine sono state monitorate complessivamente 506 sezioni: di queste, 103 sono situate al centro degli

elementi curvilinei (25 nella zona della Piana del Sele e 78 nell'area del Vallo di Diano), per un totale di 172 sezioni campionarie. La revisione dell'archivio delle curve circolari ha ravvisato la presenza di alcune sezioni campionarie “anomale”, e precisamente:

- 6 sezioni su curve di raggio $R > 2187$ m;
- 8 sezioni su curve di raggio $R < 35$ m;
- 17 sezioni in cui $V_{85\text{ ril}} \ll V_{85\text{ mod}}$ per la presenza di condizionamenti locali;
- 2 sezioni su archi di sviluppo insufficiente alla loro percezione.

Le velocità misurate in tali siti risentono di alcuni specifici fattori locali che ne alterano i valori, inficiando le regressioni. Per questi motivi esse sono state escluse dalla base di dati utilizzata per le elaborazioni, e ciò ha determinato la riduzione del campione a 114 sezioni, con raggi delle rispettive curve variabili fra 38 e 2000 m e velocità rilevate comprese tra 38 e 92 km/h.

Eseguendo diverse regressioni attraverso le procedure ed i modelli già esaminati, si sono ottenuti i risultati riassunti nella seguente tabella.

Tabella 21 V_{85} in curva: riepilogo modelli esaminati.

Equazione	Parametri regressione				p-level				R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	p_0	p_1	p_2	p_3	
$V_{85} = a_0 + a_1 \cdot CCR_s$	74,88	-0,020	-	-	0,000	0,000	-	-	0,58
	85,62	-180,26	-	-	0,000	0,252	-	-	0,21
$V_{85} = a_0 + a_1 / (R^{0,5})$	87,74	-268,17	-	-	0,000	0,000	-	-	0,46
	87,14	-211,09	-	-	0,000	0,073	-	-	0,44
	82,36	-235,70	-	-	0,000	0,000	-	-	0,47
$V_{85} = a_0 + a_1 \cdot (1/R) + a_2 \cdot (1/R)^2 + a_3 \cdot V_{amb}$	46,47	-1678,12	22013,83	0,35	0,000	0,000	0,000	0,000	0,64
$V_{85} = V_{amb} / (1 + a_0/R^{a1})$	3,47	0,48	-	-	0,000	0,000	-	-	0,57

Come c'era da aspettarsi, si palesa un migliore adattamento delle funzioni teoriche ai dati sperimentali, in particolar modo per quelle espressioni che considerano tra le variabili anche la velocità ambientale; ciò conferma la fiducia che è stata attribuita al parametro ambientale, relativo ad un tronco omogeneo, come variabile indipendente capace di migliorare la predizione della velocità operativa in una specifica sezione del tronco stesso.

Di seguito si riporta il modello di velocità operativa in curva dopo la fase di taratura, che restituisce un coefficiente di determinazione elevato ($p^2 = 0,64$) ed assume la seguente forma:

$$V_{85c} = 46.47 - 1678.12 \cdot \left(\frac{1}{R}\right) + 22013.83 \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^2 + 0.35 \cdot V_{amb}$$

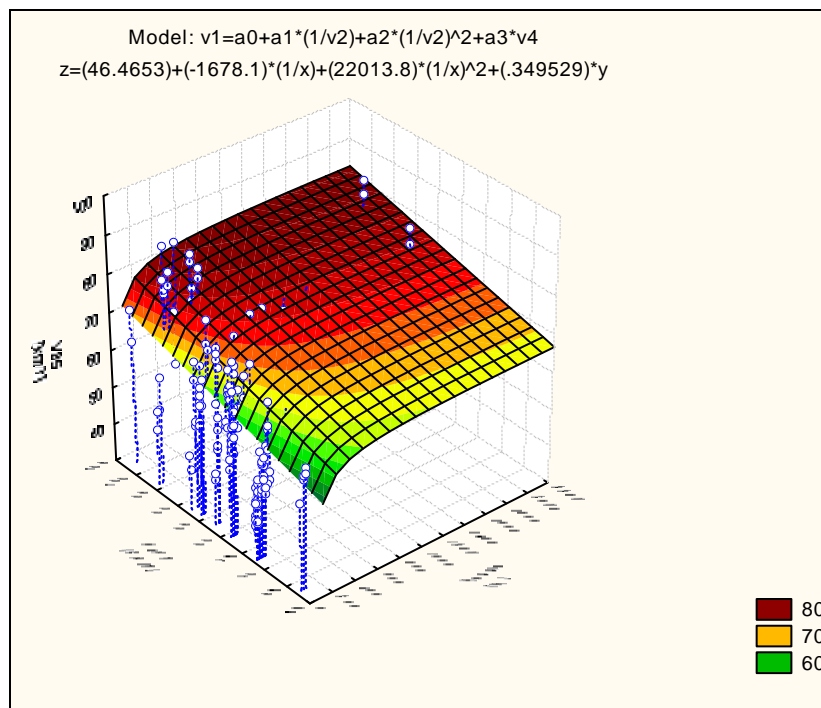


Figura 33 Modello di V_{85C} : Regressione quadratica con V_{amb} .

Tabella 22 Modello di V_{85C} : Stima dei parametri.

Model is: $v1=a0+a1*(1/v2)+a2*(1/v2)^2+a3*v4$						
Dep. Var.: V_{85C} [km/h] Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 100	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	46.47	7.38	6.30019	0.000000	31.90	61.03
a1	-1678.12	300.73	-5.58007	0.000000	-2272.16	-1084.08
a2	22013.83	10159.41	2.16684	0.031764	1946.07	42081.59
a3	0.35	0.08	4.45874	0.000016	0.19	0.50

La quantità dei dati sperimentali raccolti a tutt'oggi non esaurisce completamente la casistica in termini di tortuosità e curvatura, mentre le caratteristiche delle infrastrutture monitorate non consentono di ottenere risultati attendibili da analisi specifiche, come ad esempio quella riguardante le velocità praticate sulle sole strade statali. Questi limiti non hanno impedito, tuttavia, di dare un contributo alla ricerca sul piano sia teorico che metodologico, fornendo delle utili indicazioni per le analisi successive, che potranno aver luogo al termine delle campagne di sperimentazione attuali e future.

Considerando l'intero database a disposizione raccolto in questi anni nelle fasi operative del presente lavoro di ricerca si ottiene un modello della stessa forma analitica, ma con un coefficiente di spiegazione lievemente più grande.

La forma analitica del modello di velocità operative su curve circolari è:

$$V_{85} = a_0 + a_1 \cdot (1/R) + a_2 \cdot (1/R)^2 + a_3 \cdot V_{amb}$$

La taratura dei coefficienti del modello porta alla seguente espressione analitica:

$$V_{85c} = 46.06 - 1694.85 \cdot \left(\frac{1}{R}\right) + 22366.53 \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^2 + 0.36 \cdot V_{amb} \quad (\rho^2 = 0.66)$$

La stima dei parametri di regressione della funzione è consegnata nella seguente tabella:

Tabella 22 Modello V_{85C} : Stima dei parametri.

Model is: Vamb=a0+a1*CCR						
Dep. Var. : Vamb [km/h] Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 164	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	46.06	7.280	6.32688	0.000000	31.69	60.43
a1	-1694.85	291.765	-5.80895	0.000000	-2270.95	-1118.75
a2	22366.53	9916.333	2.25552	0.025432	2786.39	41946.67
a3	0.36	0.077	4.62525	0.000008	0.20	0.51

La forma grafica del modello è riportata nella seguente figura:

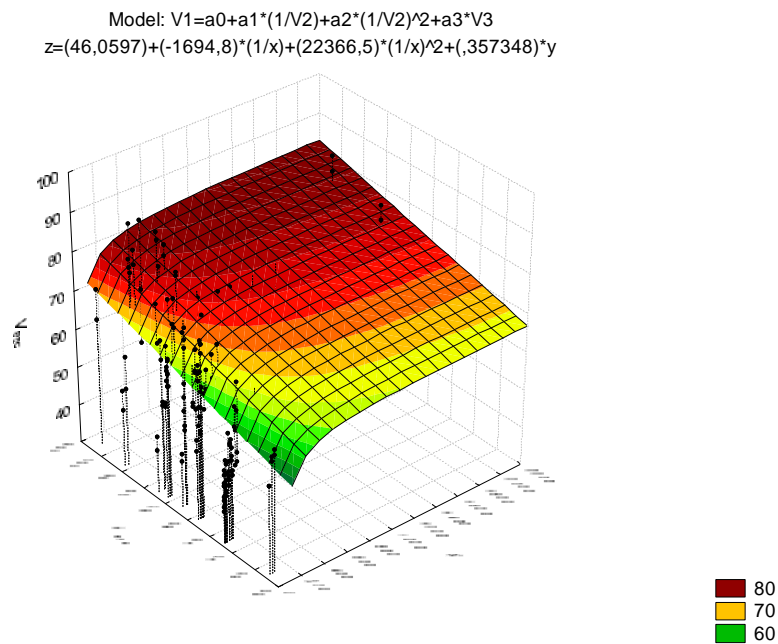


Figura 34 Modello V_{85C} : Regressione.

Il seguente grafico riporta i valori normali attesi in funzione dei valori residuali.

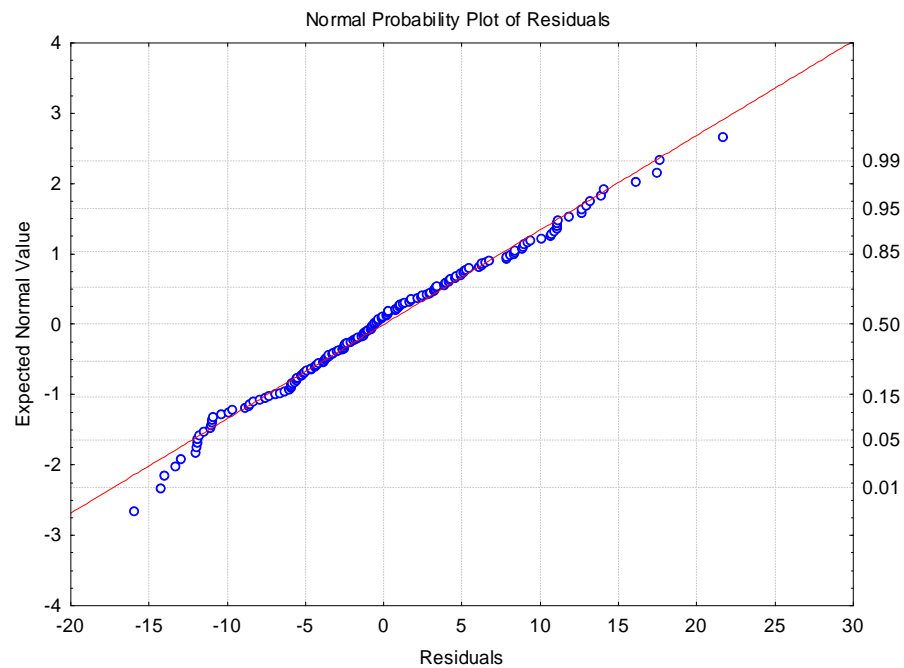


Figura 35 Modello V_{85C} : Valori normali attesi in funzione dei valori residuali.

Il seguente grafico riporta i valori osservati in funzione dei valori predetti.

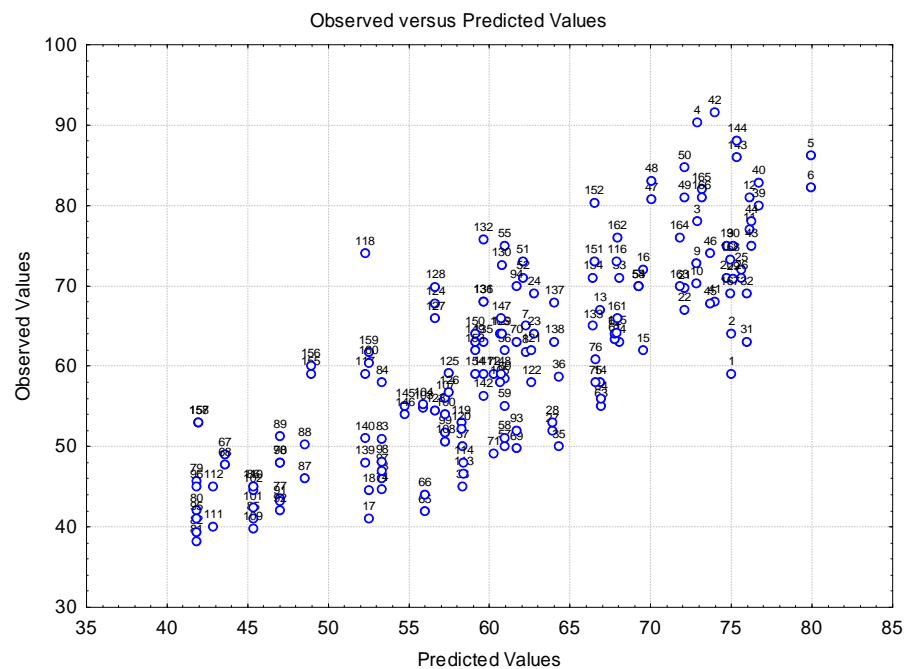


Figura 36 Modello V_{85C} : Valori osservati in funzione dei valori predetti.

Il seguente istogramma riporta la frequenza della distribuzione espressa come numero di osservazioni in funzione dei valori residuali.

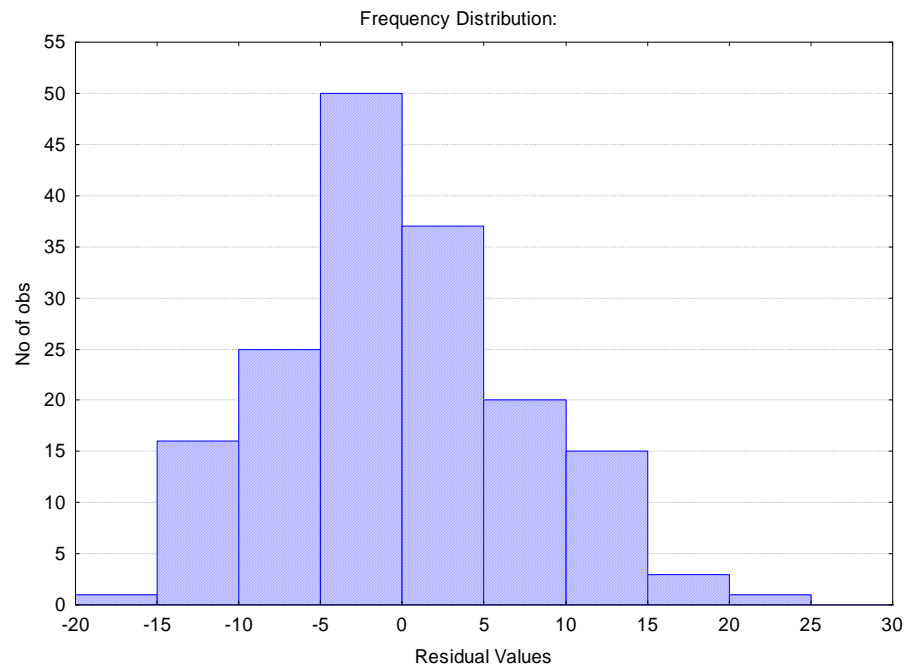


Figura 37 Modello V_{85C} : Numero di osservazioni in funzione dei valori residuali.

Il seguente grafico riporta i valori normali attesi in funzione dei valori assoluti dei residuali.

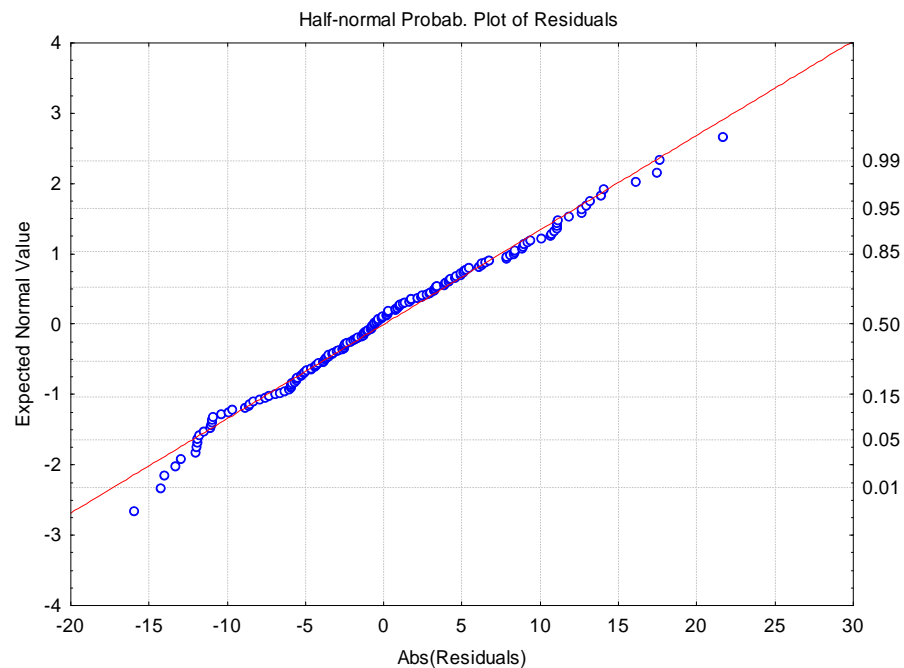


Figura 38 Modello V_{85C} : Valori normali attesi in funzione dei valori assoluti dei residuali.

La seguente figura riporta i valori normali attesi in funzione dei valori assoluti dei residuali.

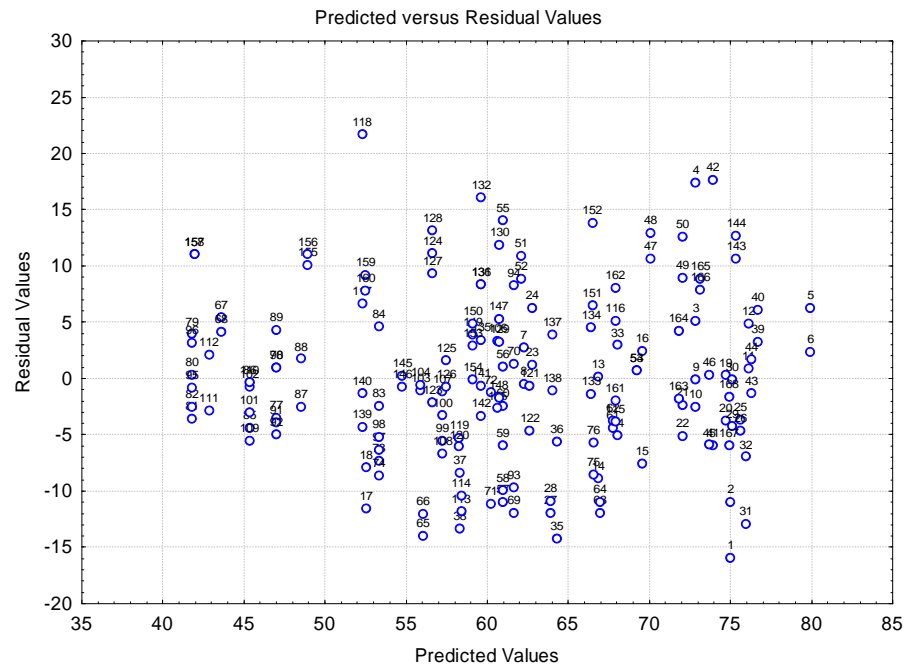


Figura 39 Modello V_{85C} : Valori residuali in funzione dei valori predetti.

La stima delle medie e deviazioni standard della funzione è consegnata nella seguente tabella:

Tabella 23 Modello V_{85C} : Medie e Deviazioni Standard.

Means and Standard Deviations				
Variable	Mean	Standard Deviation	Minimum	Maximum
R	215.0952	333.4496	35.0000	2.000
V_{env}	81.9601	9.1350	63.0000	102.650
V_{85C}	61.2417	12.5315	38.2500	91.600

Di seguito si riportano le correlazioni fra le variabili del modello.

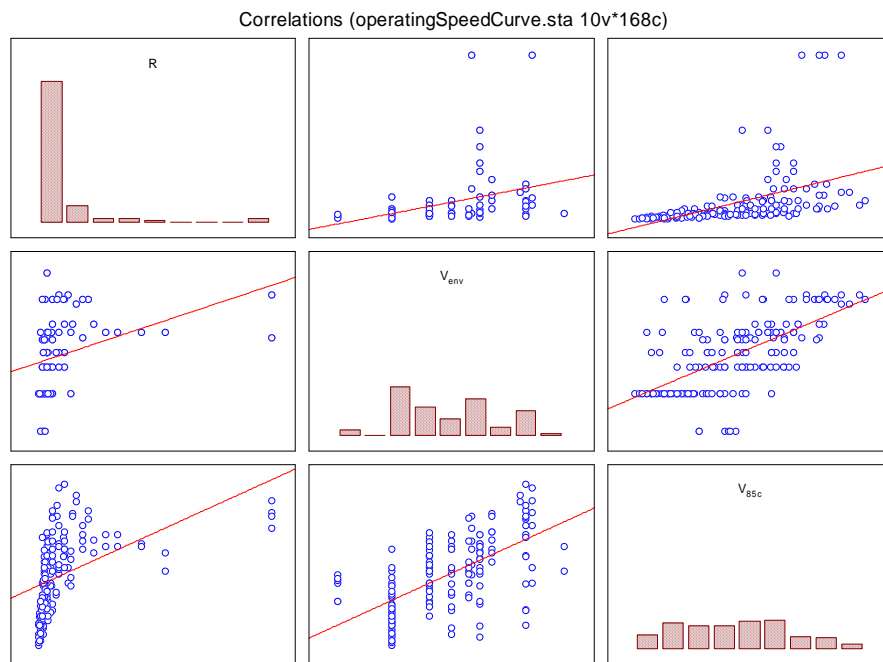


Figura 40 Modello V_{85c} : Correlazioni fra le variabili.

Il metodo di analisi preliminare adottato con successo nello studio della velocità operativa in curva, suggerisce di realizzare diagrammi a dispersione in cui la variabile dipendente velocità operativa in rettilineo V_{85T} , che viene messa a confronto con le grandezze rappresentative dell'elemento geometrico in oggetto o degli elementi ad esso contigui.

Il seguente diagramma a dispersione mostra l'andamento delle velocità operative rilevate sui rettilinei rispetto alle lunghezze degli elementi stessi. Si nota una marcata dispersione dei dati in corrispondenza di tutte le classi di lunghezza, sia valutando i dati nel loro complesso che considerando le singole strade; inoltre la variazione della velocità al crescere di L_T (*length of tangent*) appare piuttosto debole, e di ciò bisognerà tener conto se si mira ad individuare una relazione di dipendenza della V_{85T} dallo sviluppo del rispettivo rettilineo.

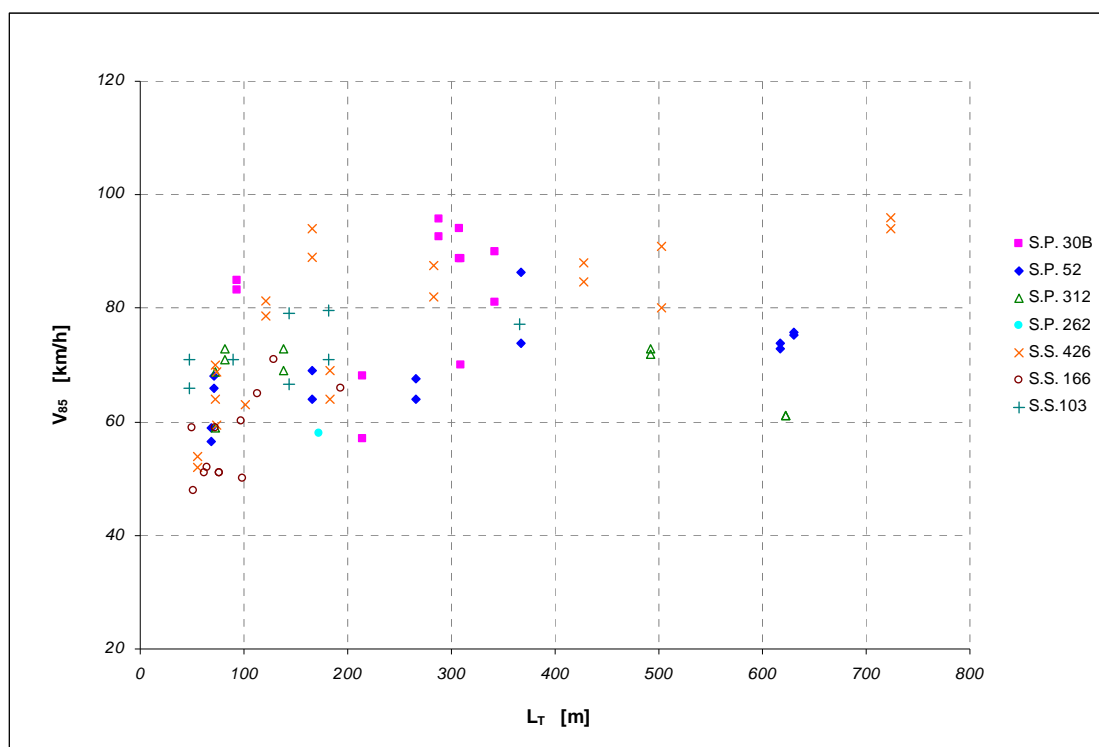


Figura 41 Diagramma a dispersione V_{85T} in funzione della L_T .

I rettilinei considerati nel database sono soltanto quelli *dependenti* dagli elementi circolari tra i quali s'interpongono. Questa constatazione conduce ad un'ulteriore analisi per esaminare i dati delle velocità operative in rettilineo in funzione di quelle in curve circolari che precedono i rettilinei. Si ottiene così il diagramma a dispersione che segue, il quale evidenzia una certa proporzionalità tra le due variabili, sia pure con una notevole fluttuazione dell'andamento e con qualche incoerenza rispetto alle supposizioni teoriche: la velocità operativa rilevata in rettilineo risulta inferiore, talvolta,

a quella rilevata sulla curva precedente, come se gli utenti rallentassero sull'elemento rettilineo piuttosto che accelerare.

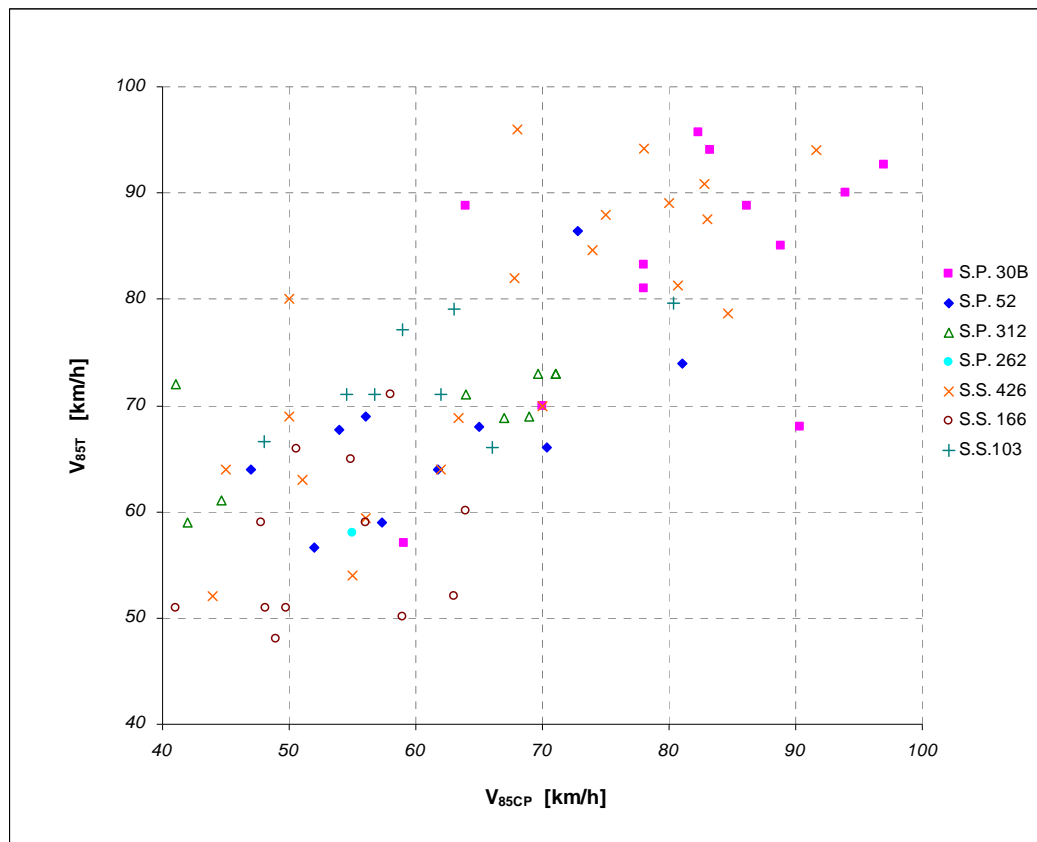


Figura 42 Diagramma a dispersione $V_{85T} - V_{85C}$.

Dopo queste osservazioni introduttive si passa, come già fatto per gli altri modelli analizzati prima, alla formulazione di un modello di velocità operativa in rettilineo, assumendo delle formulazioni matematiche “di tentativo”.

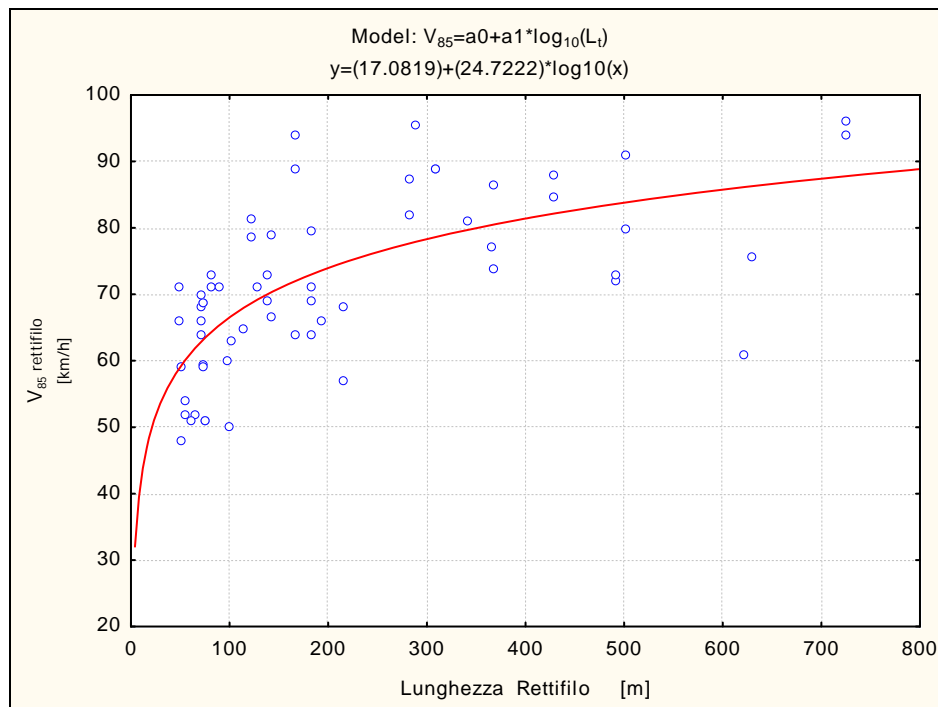
In prima istanza, è stato analizzato un modello di dipendenza tra la velocità operativa e la lunghezza del rettilineo, dove quest'ultima, a causa della bassa proporzionalità evidenziata dal diagramma a dispersione, viene introdotta con il logaritmo decimale; la relazione è di tipo lineare:

$$V_{85} = a_0 + a_1 \cdot \log(L_T)$$

Questo modello di regressione è stato applicato ai dati di tutte le strade osservate. Con il metodo dei minimi quadrati si sono ottenuti i risultati riportati in tabella che corrispondono alla stima puntuale dei parametri della regressione, con l'indicazione dei rispettivi limiti inferiore e superiore per l'intervallo di confidenza; si ha, inoltre, $\rho^2 = 0,45$. In figura è plottata la funzione.

Tabella 24 Modelli di V_{85T} : Stima dei parametri.

Model is: $V_1=a_0+a_1*\log_{10}(V_2)$						
Dep. Var.: V_{85T} [km/h]. Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 59	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	17.081	7.858	2.173	0.033	1.356	32.807
a1	24.722	3.540	6.982	0.000	17.637	31.806

**Figura 43 Modelli di V_{85T} : Regressione lineare.**

Nell'intento di ottenere un migliore adattamento del modello ai dati campionari, si decide di esaminare un altro tipo di corrispondenza: quella fra la velocità operativa rilevata sul rettifilo e la velocità rilevata nella sezione centrale della curva che lo precede; laddove quest'ultima non esistesse – ad esempio se il rettifilo è posto all'inizio del tracciato – l'elemento rettilineo in questione verrà escluso dall'elaborazione. La funzione esaminata è di tipo lineare:

$$V_{85} = a_0 + a_1 \cdot V_{85Cp}$$

La regressione fornisce le stime riassunte nella tabella ed un coefficiente di determinazione $\rho^2 = 0,43$.

Tabella 25 Modelli di V_{85T} : Stima dei parametri.

Model is: $V_1=a_0+a_1*V_4$						
Dep. Var.: V_{85T} [km/h]. Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 68	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	31.89	5.985	5.328	0.000	19.91	43.86
a1	0.61	0.091	6.728	0.000	0.434	0.80

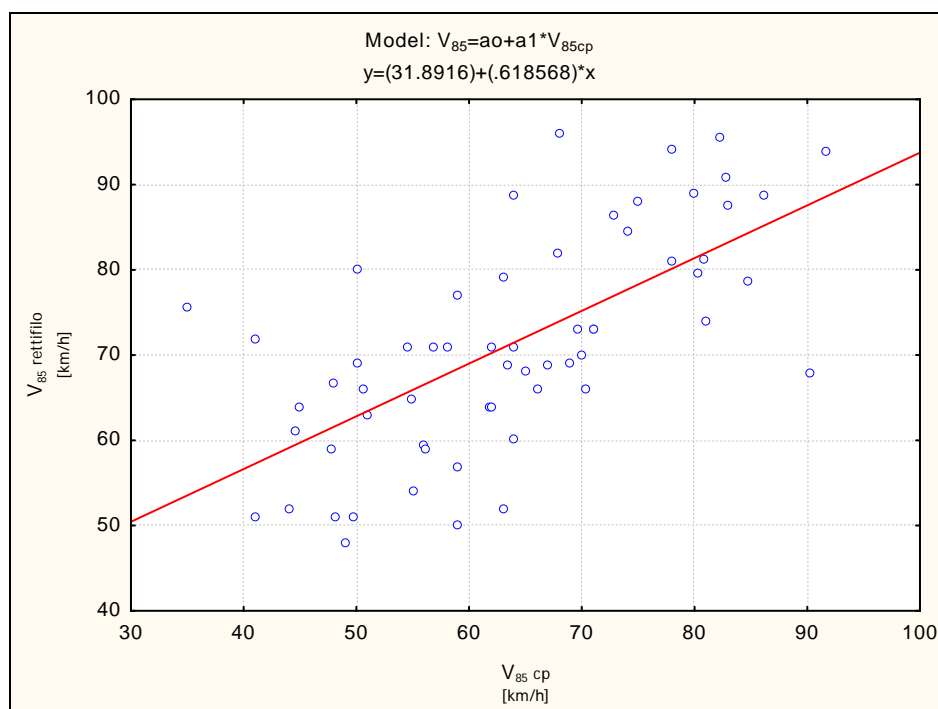


Figura 44 Modelli di V_{85T} : Regressione lineare.

Questo primo livello di analisi fornisce importanti informazioni circa l'effettiva significatività delle variabili prescelte.

Nello specifico, si osserva come la velocità operativa praticata dagli utenti lungo un rettililo dipenda solo in parte dalla lunghezza di quest'ultimo, pur essendone condizionata in misura diretta. D'altra parte, la V_{85T} non può essere motivata in maniera esauriente dalla sola velocità dell'elemento curvilineo che precede il rettililo, sebbene sia innegabile il legame esistente tra le due grandezze.

Per di più, la *dipendenza* inizialmente ipotizzata per i rettifili, basata sull'adozione di un valore "di soglia" della lunghezza, ha ottenuto un effettivo riscontro sperimentale proprio a valle dell'elaborazione, la quale ha dimostrato la correlazione esistente tra le velocità praticate sugli elementi contigui, nel rispetto della condizione di non raggiungimento della velocità ambientale.

Le due variabili esplicative utilizzate hanno un significato ed un'influenza sulla V_{85T} diversi tra loro. La lunghezza è rappresentativa delle dimensioni geometriche dell'elemento ed influisce sulle prestazioni che il conducente può raggiungere a parità di situazioni climatiche, di visibilità e di traffico. La velocità della curva che precede il rettililo è, invece, legata alla "esperienza pregressa" degli utenti e concorre indirettamente alla costituzione della V_{85T} come parametro "di sintesi" delle

informazioni acquisite sull'elemento (e, più in generale, sul tratto omogeneo) che precede quello in esame.

Le considerazioni su esposte rafforzano il convincimento che una combinazione delle due variabili possa aumentare le capacità previsionali dei modelli analizzati in precedenza, al pari di quanto avviene per alcune relazioni rinvenute in letteratura scientifica.

Sulla scorta degli studi sperimentali citati precedentemente si sceglie di utilizzare come modello di velocità operativa in rettilineo una funzione lineare della velocità operativa della curva precedente e del logaritmo decimale della lunghezza:

$$V_{85} = a_1 \cdot V_{85Cp} + a_2 \cdot \log_{10}(L_T)$$

La taratura conduce all'espressione:

$$V_{85} = 0,47 \cdot V_{85Cp} + 18,75 \cdot \log_{10}(L_T)$$

Le stime sono riportate in tabella, nonché la rappresentazione grafica in figura.

Tabella 26 Modelli di V_{85T} : Stima dei parametri.

Model is: $V1 = a1 \cdot V4 + a2 \cdot \log_{10}(V2)$						
Dep. Var.: V_{85T} [km/h]. Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 68	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a1	0.47	0.060	7.890	0.000	0.35	0.59
a2	18.75	1.765	10.623	0.000	15.22	22.28

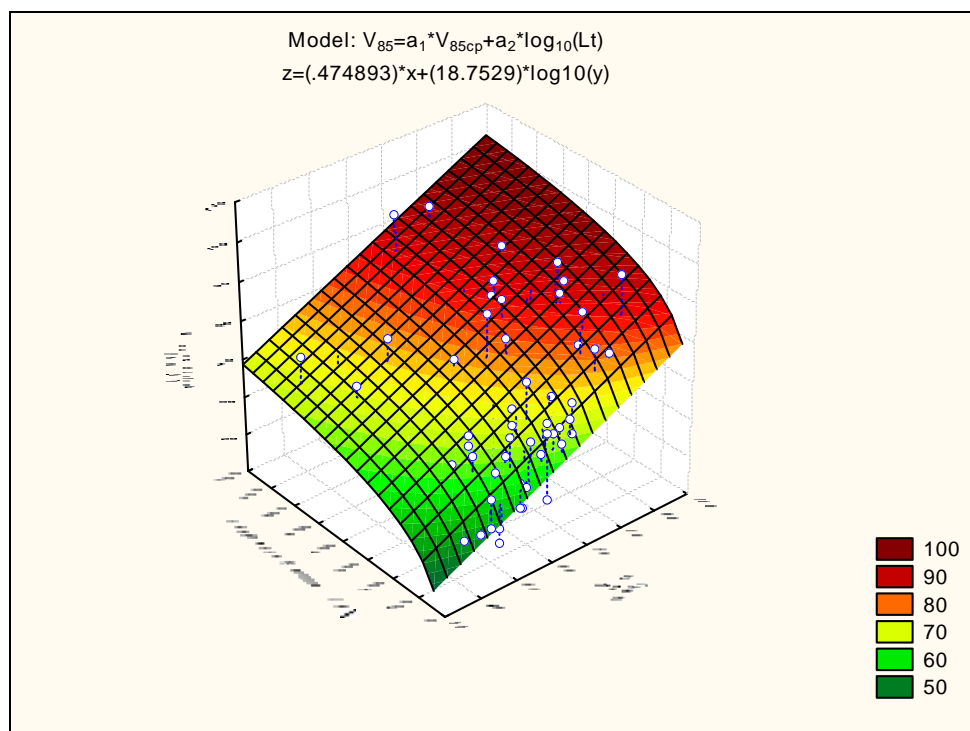


Figura 45 Modelli di V_{85T} : Regressione bilineare.

Il coefficiente di determinazione del modello è $\rho^2 = 0,712$. Provando ad utilizzare l'espressione ottenuta aggiungendo il termine noto, la regressione restituisce un coefficiente $\rho^2 = 0,714$, ma il valore stimato per la stessa costante risulta non significativo ($p\text{-level} = 0,51 > 0,05$); inoltre, altre variabili indipendenti non considerate finora, quali la densità di accessi per chilometro [$n^{\circ}\text{acc./km}$] o la larghezza media della carreggiata [m], non contribuiscono ad aumentare la bontà del modello. La relazione suddetta è il miglior compromesso tra significatività statistica (validità della regressione) e semplicità formale (come nel caso delle curve si preferiscono modelli dipendenti da poche variabili e di non difficile implementazione).

Bisogna rimarcare, però, che le velocità sugli elementi consecutivi sono state correlate tra loro senza tener conto delle possibili anomalie che potrebbero presentarsi su alcune delle “curve precedenti”. Infatti, in talune sezioni di centro curva possono esistere delle situazioni di condizionamento locale che rendono i valori di velocità lontani da quelli che si realizzano nelle ipotesi di studio.

Queste sezioni campionarie sono state individuate attraverso criteri di valutazione della possibilità di esclusione dall'archivio dati e, quindi, dalle regressioni finali per il modello di velocità operativa in curva.

Onde evitare che quegli stessi dati di rilevamento vadano a compromettere la validità del modello previsionale proposto per i rettifili, è opportuno procedere ad una revisione dei siti riguardanti gli elementi rettilinei. Tale operazione viene inquadrata anche nell'ottica della realizzazione di un'*interdipendenza* tra i modelli di velocità operativa in curva e in rettilo.

In altre parole, il modello si presenta del tutto indipendente da quello per la previsione delle velocità operative in curva. Imponendo che vi sia coerenza tra dati utilizzati per la calibrazione dei due modelli, si stabilisce un'interrelazione di fatto tra di essi dove il legame è la scelta dei dati per l'implementazione.

Lo screening suppletivo punta al riconoscimento delle sezioni al centro delle curve precedenti i rettifili oggetto di studio, per le quali i valori di velocità operativa rilevati sono anomali, poi si escludono dal database i rettifili corrispondenti.

Questo processo porta ad individuare 18 valori campionari di V_{85Cp} devianti e, conseguentemente, altrettante sezioni campionarie di rettilo sono eliminate dall'archivio.

Le strade monitorate nel corso dell'anno 2007 consentono di ottenere informazioni e dati di rilevamento su un totale di 73 rettifili. Tra essi vengono selezionati per le elaborazioni soltanto gli elementi “dipendenti” e quelli “percepibili come tali” identificati in 48 rettifili aventi lunghezza

compresa tra i 50 ed i 750 m. Su un rettifilo si trovano, sovente, diversi siti di osservazione, per ciascuno dei quali si ottiene un valore della velocità operativa: il massimo tra questi è stato assunto come il valore di velocità operativa rappresentativa del rettifilo in esame. Pertanto si hanno 73 sezioni campionarie distribuite su 48 rettifili. Si noti che le sezioni campionarie non sono in numero esattamente doppio rispetto agli elementi di appartenenza: questa circostanza è dovuta al fatto che per alcune sezioni campionarie mancano i dati riguardanti la curva precedente – fondamentali all’implementazione del modello –, o perché non esiste (caso del rettifilo di estremità) o perché, pur esistendo, non è stato monitorato.

Ai fini dell’analisi di regressione sui dati, tra le sezioni sono state escluse quelle per le quali la velocità operativa della curva che precede il rettifilo assume un valore giudicato atipico. L’eliminazione delle sezioni di curva anomale dal database costruito per le elaborazioni riguardanti i rettifili mira a rendere congruenti le analisi modellistiche.

In base alle analisi condotte e sulla scorta di quanto viene proposto in letteratura, si prendono in considerazione due modelli, uno coincidente con la relazione già analizzata in precedenza, e l’altro avente le stesse variabili esplicative ma con una dipendenza dalla lunghezza del rettifilo di tipo potenza:

$$V_{85} = a_1 \cdot V_{85Cp} + a_2 \cdot L_T^{a_3}$$

La taratura del modello di velocità operativa in rettifilo corto funzione lineare della velocità operativa sulla curva precedente e funzione logaritmica decimale della lunghezza del rettifilo porta alla seguente espressione analitica con un buon grado di correlazione:

$$V_{85} = 0,47 \cdot V_{85Cp} + 18,75 \cdot \log_{10}(L_T) \quad (p^2 = 0,71)$$

La stima dei parametri ed il modello di regressione sono riportati nella seguente tabella e nella seguente figura.

Tabella 27 Modelli di V_{85T} : Stima dei parametri.

Model is: $V1 = a1 \cdot V4 + a2 \cdot \log_{10}(V2)$						
Dep. Var.: V_{85T} [km/h]. Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 50	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a1	0.47	0.060	7.890	0.000	0.35	0.59
a2	18.75	1.765	10.623	0.000	15.22	22.28

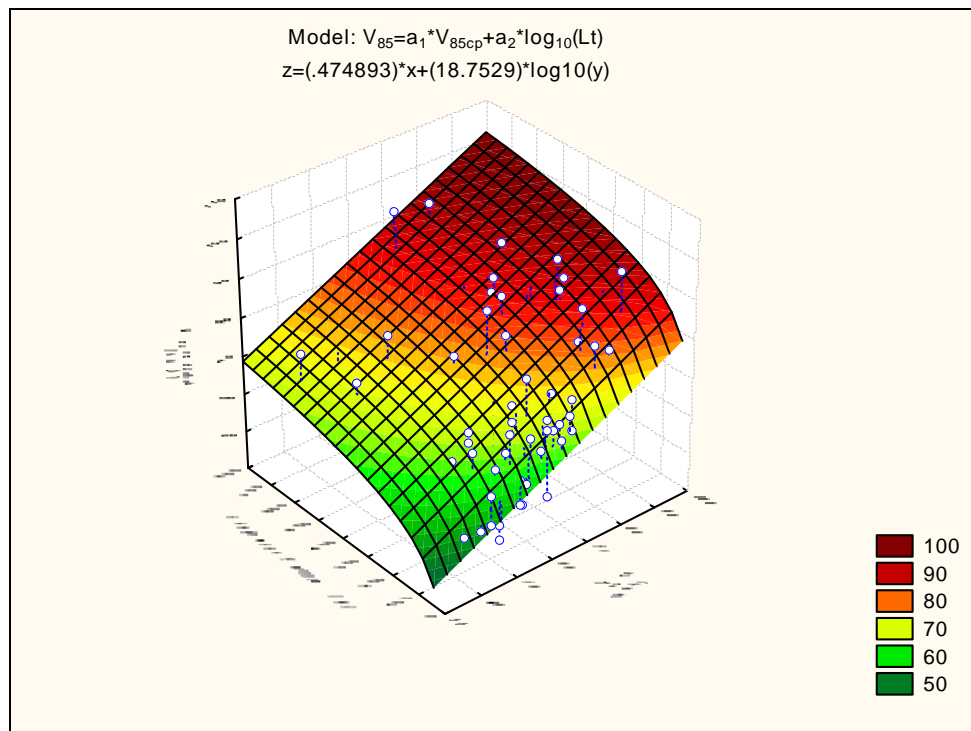


Figura 46 Modelli di V_{85T} : Regressione.

Invece, la taratura del modello di velocità operativa in rettilineo corto funzione lineare della velocità operativa sulla curva precedente e funzione potenza della lunghezza del rettilineo porta alla seguente espressione analitica con un lievemente miglior grado di correlazione:

$$V_{85} = 0.51 \cdot V_{85cp} + 12.85 \cdot L_T^{0.22} \quad (\rho^2 = 0,72)$$

La stima dei parametri ed il modello di regressione sono riportati nella seguente tabella e nella seguente figura.

Tabella 28 Modelli di V_{85T} : Stima dei parametri.

Model is: $V1 = a1 \cdot V4 + a2 \cdot V2^{a3}$						
Dep. Var.: V_{85T} [km/h]. Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 50	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a1	0.51	0.068	7.415	0.000	0.370	0.64
a2	12.85	3.267	3.932	0.000	6.306	19.38
a3	0.22	0.033	6.547	0.000	0.151	0.28

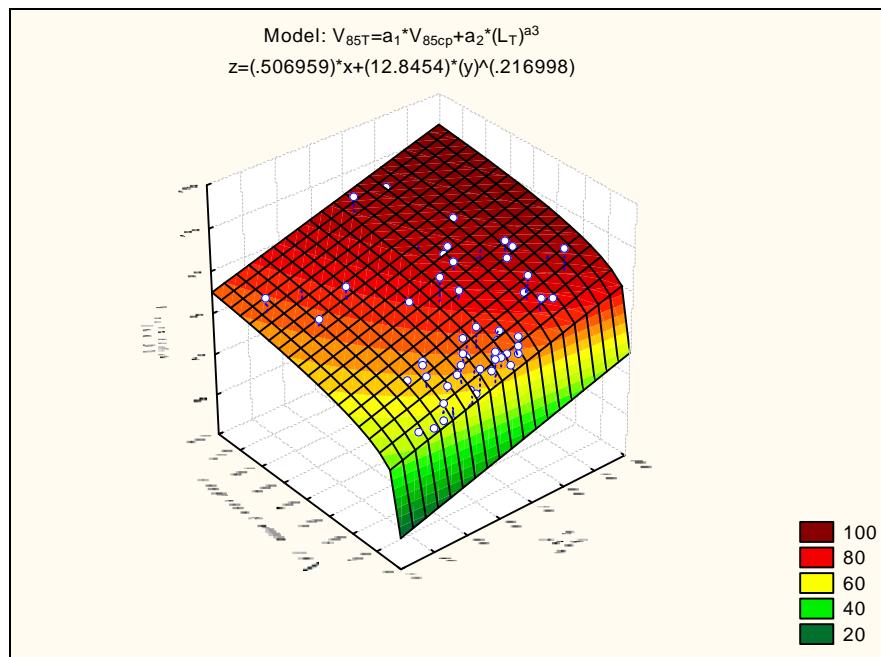


Figura 47 Modello di V_{85T} : Regressione potenza.

I parametri stimati in entrambi i modelli risultano significativi al 95% ($p\text{-level} < 0,05$) ed anche gli indici di dispersione (*standard error*) sono prossimi tra loro.

Considerando l'intero database a disposizione raccolto in questi anni nelle fasi operative del presente lavoro di ricerca si ottiene un modello della stessa forma analitica, ma con un coefficiente di spiegazione più piccolo.

La forma analitica del modello di velocità operativa in rettilineo è:

$$V_{85} = a_1 \cdot V_{85CP} + a_2 \cdot L_T^{a_3}$$

La taratura dei coefficienti del modello porta alla seguente espressione analitica:

$$V_{85T} = 0.385322 \cdot V_{85CP} + 22.6566 \cdot L_T^{0.13630} \quad (R^2 = 0.57)$$

La stima dei parametri di regressione della funzione è consegnata nella seguente tabella:

Tabella 29 Modello V_{85T} : Stima dei parametri.

Model is: $V1=a0*V2+a1*V3^{a2}$						
Dep. Var. : V_{85T} [km/h]. Level of confidence: 95.0% ($\alpha=0.050$)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 70	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	0.38532	0.07191	5.389800	0.000001	0.24274	0.52791
a1	22.65660	4.116506	5.503841	0.000001	14.44648	30.86671
a2	0.13630	0.023598	5.775831	0.000000	0.08923	0.18336

La forma grafica del modello è riportata nella seguente Figura 48:

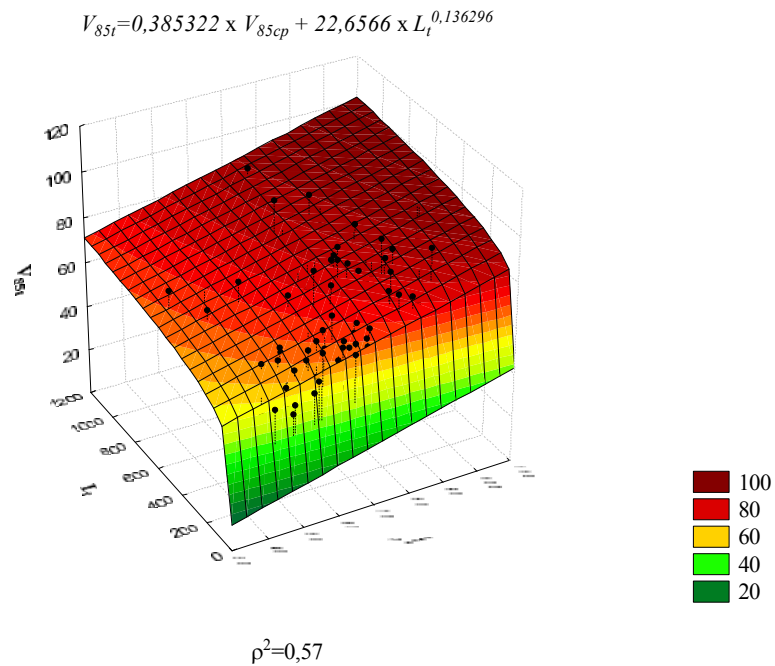


Figura 48 Modello V_{85T} : Regressione.

Il seguente grafico in Figura 49 riporta i valori normali attesi in funzione dei valori residuali.

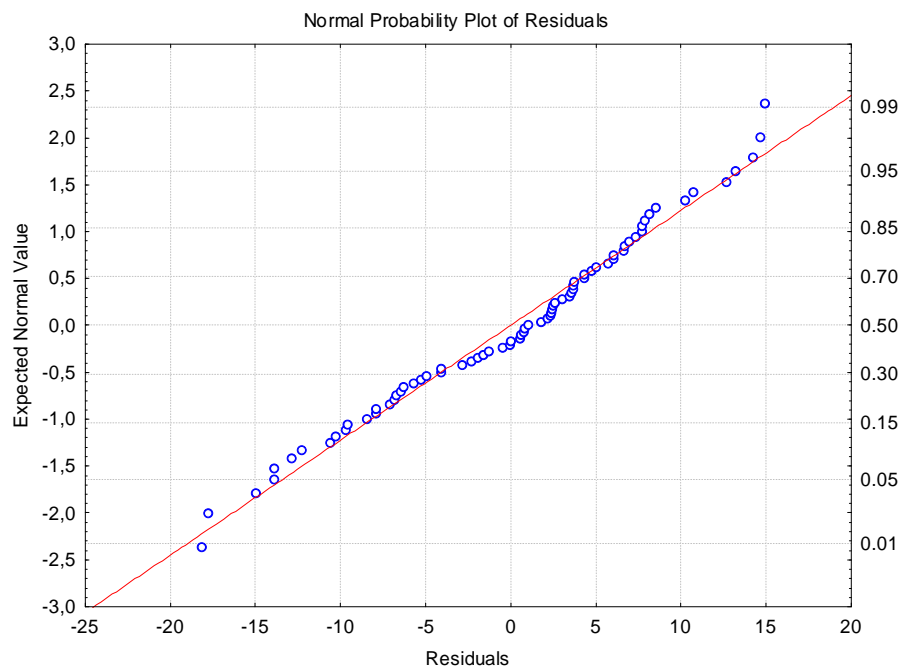


Figura 49 Modello V_{85T} : Valori normali attesi in funzione dei valori residuali.

Il seguente grafico in Figura 50 riporta i valori osservati in funzione dei valori predetti.

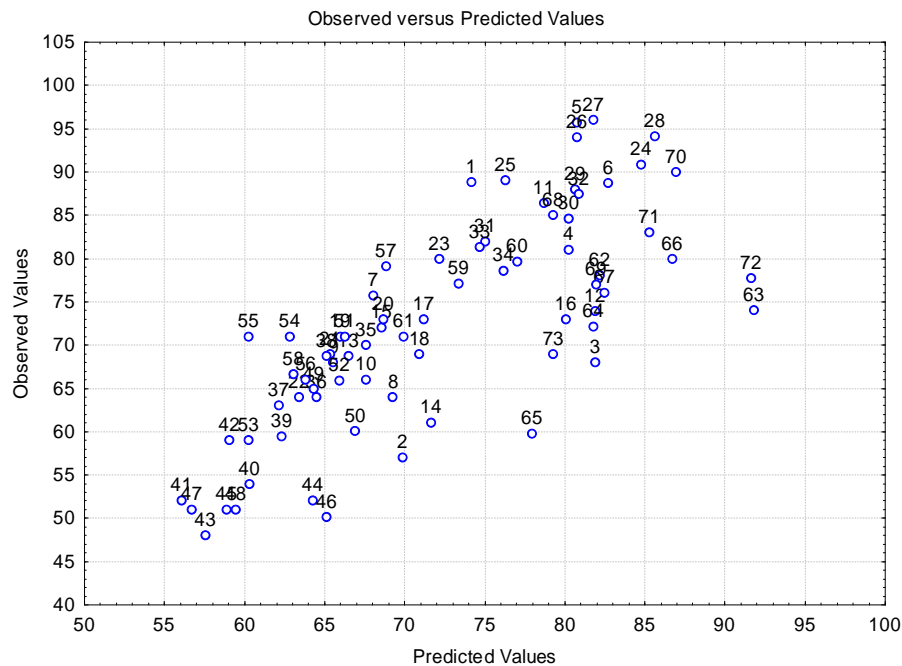


Figura 50 Modello V_{85T} : Valori osservati in funzione dei valori predetti.

L'istogramma della seguente Figura 51 riporta la frequenza della distribuzione espressa come numero di osservazioni in funzione dei valori residuali.

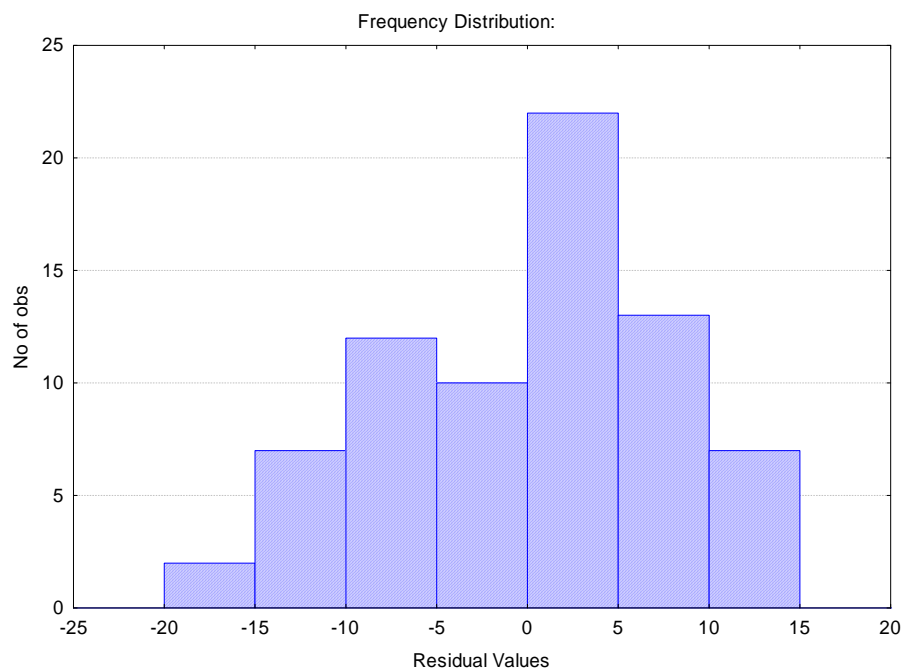


Figura 51 Modello V_{85T} : Numero di osservazioni in funzione dei valori residuali.

Il grafico in Figura 52 riporta i valori normali attesi in funzione dei valori assoluti dei residuali.

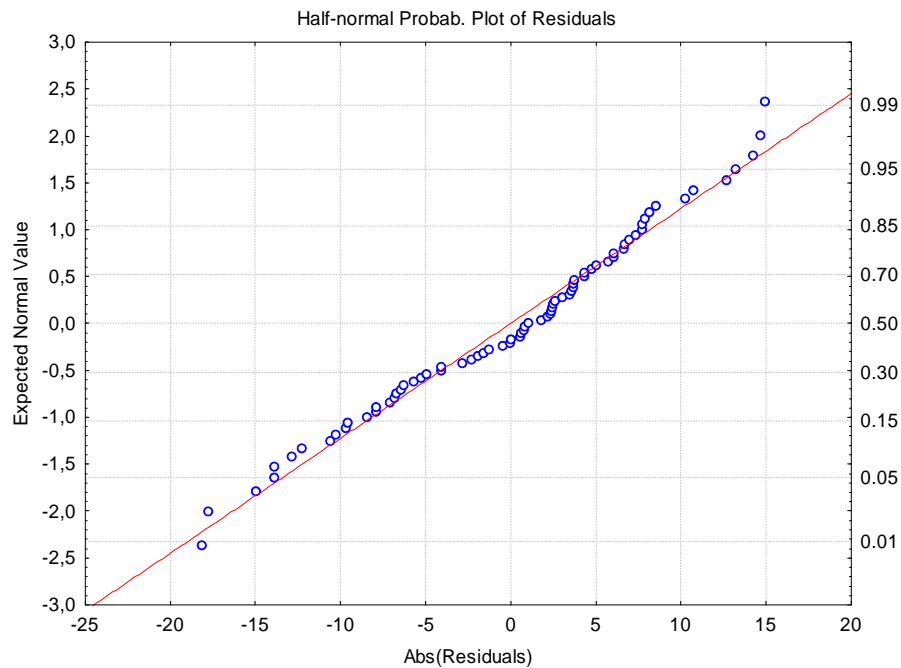


Figura 52 Modello V_{85T} : Valori normali attesi in funzione dei valori assoluti dei residuali.

La seguente Figura 53 riporta i valori normali attesi in funzione dei valori assoluti dei residuali.

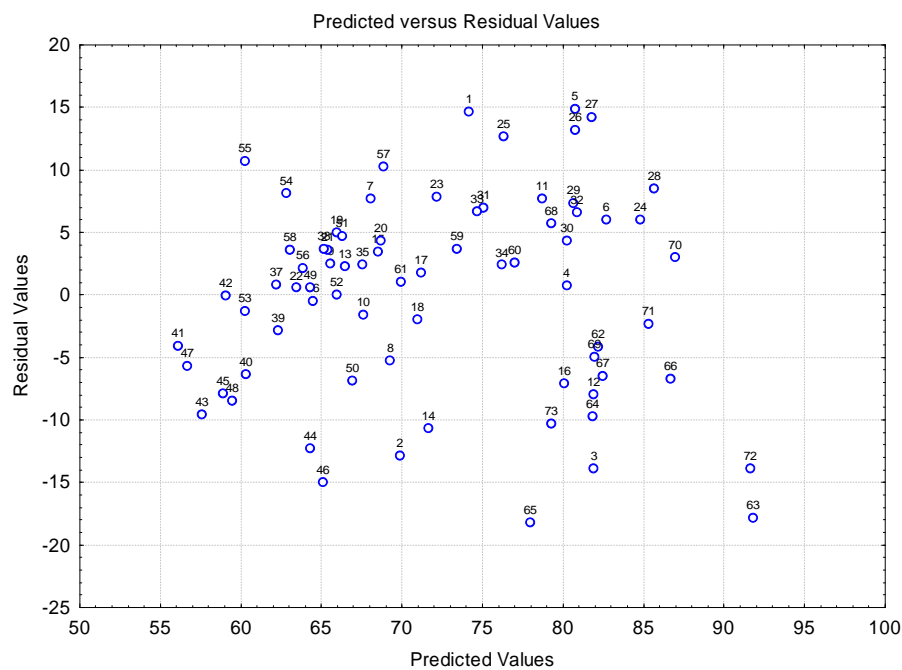


Figura 53 Modello V_{85T} : Valori residuali in funzione dei valori predetti.

La stima delle medie e deviazioni standard della funzione è consegnata nella seguente tabella:

Tabella 30 Modello V_{85C} : Medie e Deviazioni Standard.

Means and Standard Deviations				
Variable	Mean	Standard Deviation	Minimum	Maximum
V_{85Cp}	66.0979	14.2562	35.000	101.000
L_T	278.1718	240.2287	48.000	1082.000
V_{85T}	72.2021	12.1808	48.000	96.000

Di seguito si riportano le correlazioni fra le variabili del modello.

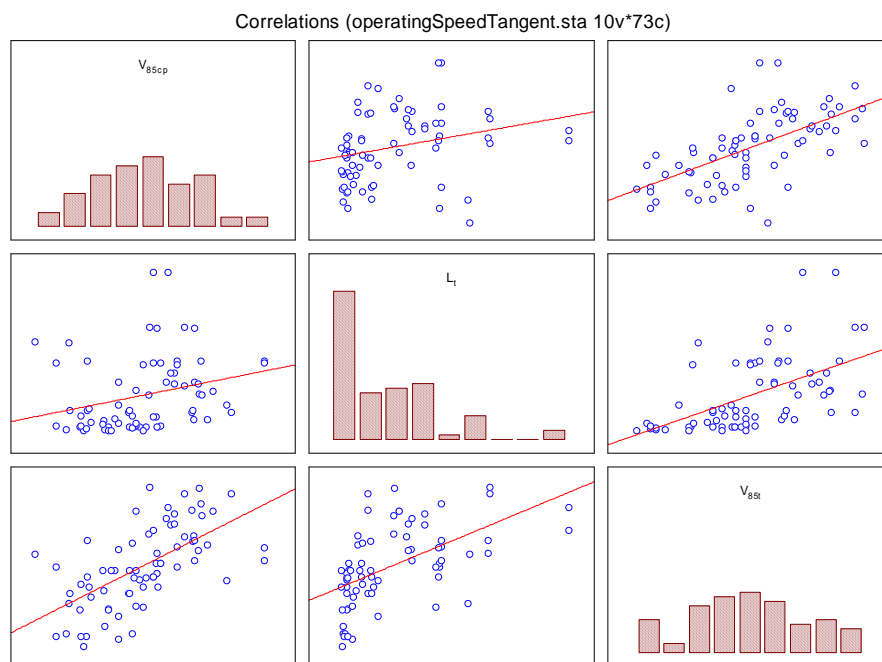


Figura 54 Modello V_{85T} : Correlazioni fra le variabili.

Da ultimo, si fa osservare che i dati con i quali è stato tarato il modello di velocità operativa in curva sono collezionati sempre sulle sezioni centrali degli archi circolari.

Nel caso dei rettifili, invece, si è assunta la massima velocità operativa delle sezioni monitorate lungo l'elemento indipendentemente dalla posizione sull'elemento (centro o quarti): il modello costruito per le curve prevede la posizione in cui si verificherà il valore predetto, quello per i rettilinei non fornisce alcuna indicazione sulla localizzazione. Questa circostanza è imputata al minore condizionamento sulla condotta di guida degli utenti stradali su strade extraurbane a due corsie a carreggiata unica e doppio senso di marcia che percorrono un elemento rettilineo piuttosto che una curva.

I modelli predittivi della velocità ambientale ed operativa sono il risultato di un processo oneroso in termini operativi e computazionali, che partendo dall'analisi teorica giunge sino al trattamento analitico su basi statistiche, passando per l'osservazione sperimentale diretta ed il filtraggio delle misure effettuate. Seguendo questo iter, si è giunti all'implementazione di modelli in grado di prevedere con buona approssimazione la velocità attuata dagli utenti sugli elementi costituenti il tracciato plano-altimetrico. A tal proposito si ricorda che i siti infrastrutturali viari monitorati sono privi di curve di transizione perché realizzazione non frutto di un *road design* moderno (nel rispetto delle norme di progettazione geometrica e funzionale e nell'ottica della sicurezza della circolazione veicolare su gomma), ma frutto di realizzazioni in tempi remoti e successivi occasionali rimaneggiamenti.

L'importanza di predire la velocità praticata lungo l'infrastruttura stradale (parametro forse più rappresentativo del comportamento di guida) risiede nella possibilità di effettuare delle verifiche di congruenza del tracciato, che consentano di giudicare in che misura esso risponde alle aspettative dell'utenza. Uno strumento per le verifiche di omogeneità del tracciato è proprio il profilo delle velocità operative.

Le formulazioni proposte derivano da indagini condotte su elementi planimetrici delle strade; si attribuisce una formalizzazione di tipo matematico agli ottantacinquesimi percentili delle distribuzioni di velocità rilevate in curva, in rettilineo e su tronchi omogenei, cioè su tratti stradali dotati di autonoma influenza sul comportamento dei conducenti.

Ogni modello proposto presenta bontà di adattamento ai dati sperimentali espressa attraverso il corrispondente grado di determinazione. Una visualizzazione immediata delle differenze tra i valori rilevati e quelli previsti si può avere con la costruzione dei diagrammi a dispersione "di affidabilità", nei quali si mettono a confronto i valori di velocità rilevati con quelli calcolati tramite le espressioni funzionali riportati nel seguito.

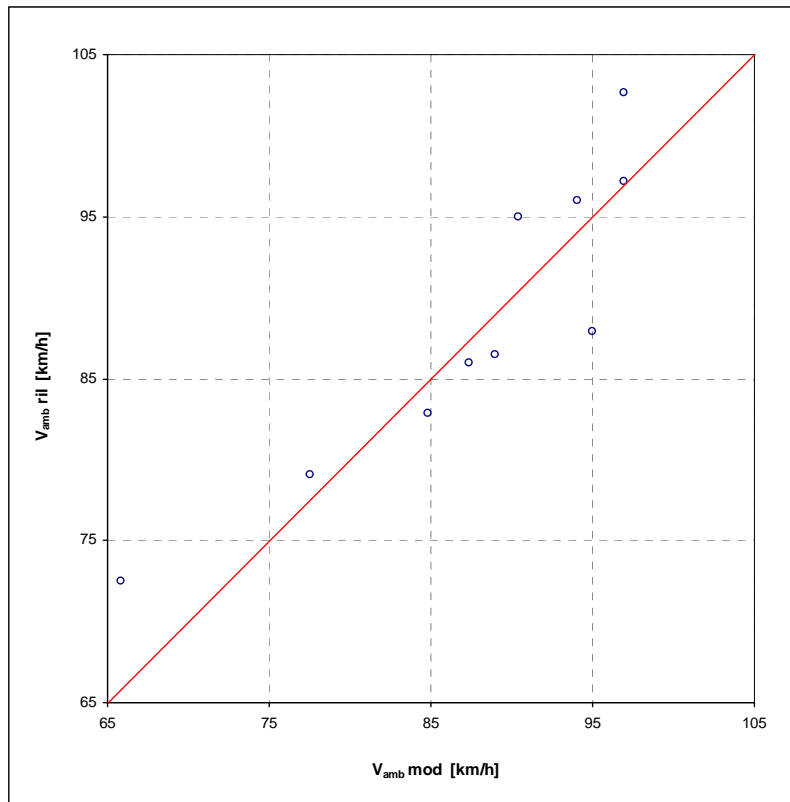


Figura 55 Affidabilità del modello di previsione della V_{amb} .

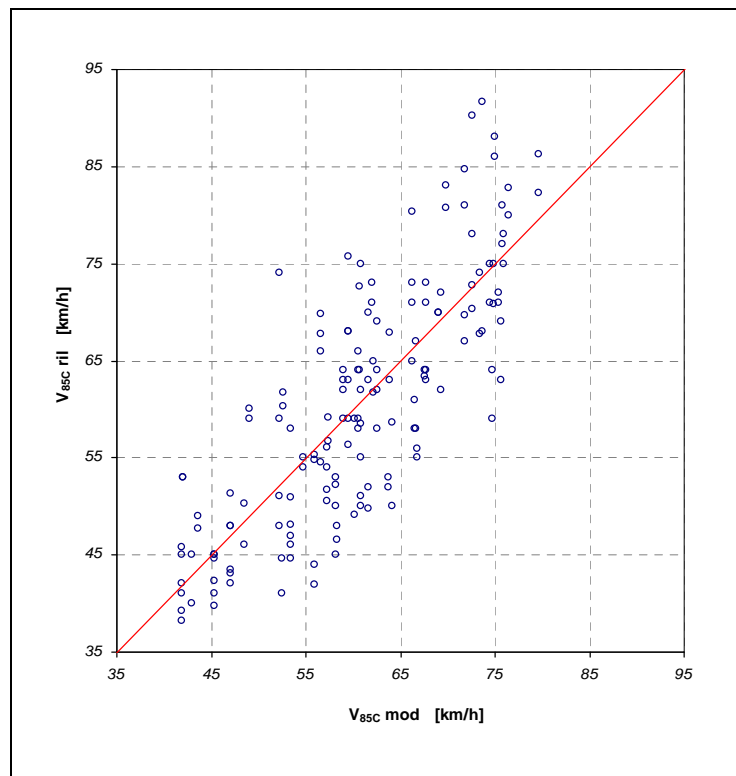


Figura 56 Affidabilità del modello di previsione della V_{85C} .

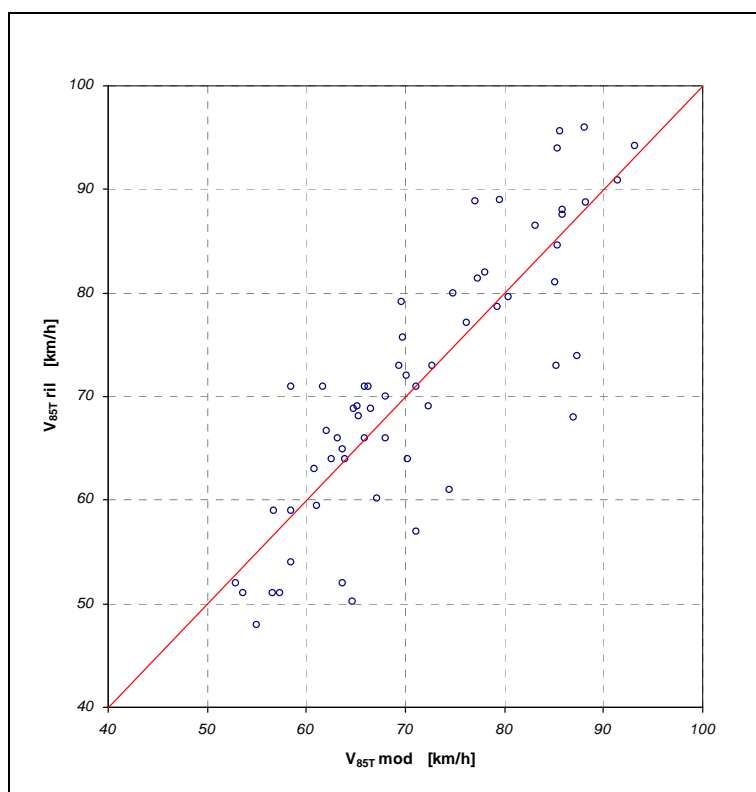


Figura 57 Affidabilità del modello di previsione della V_{85T} .

I modelli tendono a sottostimare o a sovrastimare le velocità reali in maniera del tutto casuale. Gli scarti tra i valori predetti da ciascun modello e quelli reali sono variabili aleatorie, per le quali è possibile calcolare gli indici di posizione e di dispersione (media μ e varianza σ^2).

In tabella sono riportati, per ogni tronco omogeneo, i valori medi e le deviazioni standard degli scarti tra le velocità ottenute con l'implementazione del modello e le velocità rilevate su strada. La media è calcolata su tutte le sezioni in curva ed in rettilineo secondo il modello formulato. Per la velocità ambientale il valor medio degenera nello scarto stesso, perché un solo punto campionario esiste per ogni tronco. Infine, gli stessi parametri sono stati determinati considerando le sezioni campionarie (o i tratti omogenei, per la velocità ambientale) di tutte le strade. L'analisi rivela che mentre gli scarti valutati complessivamente su tutte le strade hanno una misura nulla, lo stesso non accade qualora vengano considerati per singola infrastruttura: su talune strade le relazioni (o alcune di esse) paiono sottostimare le velocità praticate, su altre prevedono delle velocità mediamente più elevate. In particolare, sulla statale S.S. 426 le velocità reali sono superiori, in media, rispetto a quelle calcolate (scarti negativi) a motivo di un andamento geometrico più regolare e di una sede stradale più ampia.

Tabella 31 Analisi degli Scarti tra Velocità Stimate dai Modelli e Velocità Rilevate.

Strada	Tronco omogeneo	V_{amb}		V_{85C}		V_{85T}	
		ΔV	σ_{tot}	μ	σ	μ	σ
S.P. 30 B	I	-0.17	-	-1.02	12.23	2.48	12.49
S.P. 52	I	2.50	-	-1.12	2.62	1.62	7.22
S.P. 312	I	7.06	-	4.39	5.29	2.01	7.18
S.P. 262	I	-5.69	-	0.76	5.66	-	-
S.S. 426	I	-1.90	-	-1.49	9.73	-3.36	3.43
S.S. 426	II	2.00	-	2.99	8.71	-0.16	2.85
S.S. 166	I	-6.61	-	2.40	4.79	3.84	5.86
S.S. 103 (I)	I	-1.53	-	-3.42	7.08	-7.72	3.94
S.S. 103 (I)	II	-4.55	-	-11.94	1.41	-	-
S.S. 103 (II)	I	1.40	-	-3.62	4.63	0.03	0.92
S.S. 103 (II)	II	7.51	-	-9.97	1.29	-	-
TUTTE LE STRADE		0,00	4,70	0,00	7,41	0,00	6,78

Viceversa, le SP30B e SP312, che si configurano come strade con prevalenza di rettifili e curve di piccolo sviluppo e perlopiù di ampio raggio, si hanno delle velocità reali che, pure risultando elevate, sono mediamente inferiori a quelle previste, con degli scarti caratterizzati da una maggiore varianza. E ancora, sulla SS166, avente l'andamento planimetrico più tortuoso, le espressioni impiegate per il calcolo della velocità operativa approssimano in maniera soddisfacente i dati ottenuti dal monitoraggio. Queste considerazioni, seppur corrette sul piano teorico, sono da considerarsi non assolutamente valide, in quanto derivano da osservazioni condotte su dati che hanno contribuito all'operazione di taratura dei coefficienti del modello.

D'altra parte, è interessante esplorare le relazioni esistenti fra i modelli predittivi della velocità ambientale e delle velocità operative. Tali formulazioni, infatti, nonostante siano state determinate indipendentemente l'una dalle altre, presentano dei legami sia *intrinseci*, dovuti alle variabili esplicative utilizzate, che *estrinseci*, derivanti dai requisiti di "coerenza" richiesti al diagramma delle velocità.

Rappresentando i modelli nella loro forma funzionale ed evidenziandone le rispettive variabili indipendenti, si ha:

$$\begin{aligned}
 V_{amb} &= a_1 + a_2 \cdot CCR & \Rightarrow & V_{amb} = V_{amb}(CCR) \\
 V_{85C} &= a_0 + a_1 \cdot (1/R) + a_2 \cdot (1/R)^2 + a_3 \cdot V_{amb} & \Rightarrow & V_{85C} = V_{85C}(1/R, V_{amb}) \\
 V_{85T} &= a_1 \cdot V_{85Cp} + a_2 \cdot L_T^{a_3} & \Rightarrow & V_{85T} = V_{85T}(V_{85Cp}, L_T)
 \end{aligned}$$

Se si esprimono le variabili delle equazioni non legate alla geometria stradale (ad esempio le velocità), si generano delle funzioni composte che esaltano le dipendenze funzionali tra i modelli e le reciproche influenze:

$$V_{amb} = V_{amb}(CCR) \Rightarrow V_{amb} = f_1(CCR)$$

$$V_{85C} = V_{85C}(1/R, V_{amb}) \Rightarrow V_{85C} = f_2(1/R, CCR)$$

$$V_{85T} = V_{85T}(V_{85Cp}, L_T) \Rightarrow V_{85T} = f_3(1/R, CCR, L_T)$$

L'interrelazione tra i modelli potrebbe apparire un fatto puramente formale. Diviene, invece, sostanziale se si riferisce ad una successione di elementi appartenenti ad uno stesso tronco omogeneo di strada e percorsi nello stesso verso.

In tale ipotesi, le espressioni su scritte possono essere applicate in sequenza ed i risultati prodotti dall'una influiranno sui valori ottenuti dalle altre e, in definitiva, sul diagramma complessivo delle velocità.

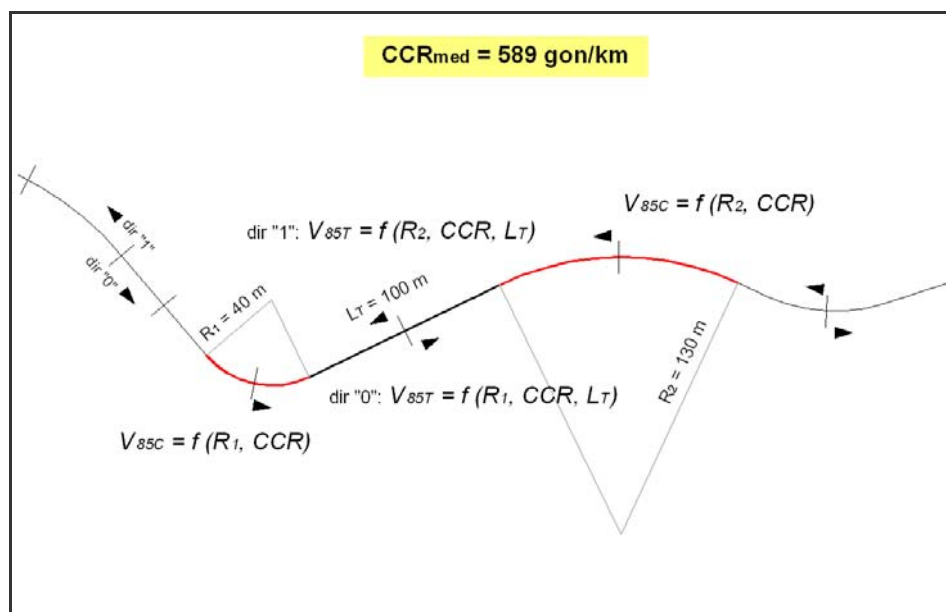


Figura 58 Successione di Elementi in un Tracciato.

L'applicazione dei modelli predittivi per la successione di elementi di un tracciato stradale è legata ad un utilizzo pratico ed operativo dei modelli di previsione: infatti, le variabili V_{amb} , V_{85Cp} e V_{85T} si possono stimare attraverso l'uso delle formulazioni analitiche. Si impone, però, un controllo sulla "coerenza" degli esiti finali conseguibili, in quanto ogni modello è implementato separatamente e deve possedere "capacità previsionali" congruenti con quelle degli altri e compatibili con l'elemento geometrico ed ambientale del tracciato.

Ciascuna relazione sperimentale, pur godendo di una sua autonomia, non può fornire dei risultati a sé stanti, se non addirittura difforni, rispetto ai valori calcolati con gli altri modelli o alle ipotesi sotto le quali essi operano. Ad esempio, un modello di previsione della velocità operativa in rettilineo V_{85T} che dà come risultato una velocità sempre inferiore a quella calcolata sulla curva precedente con la rispettiva espressione empirica – a parità di raggio e di CCR –, è estremamente criticabile sotto il profilo della coerenza e delle potenzialità interpretative del comportamento degli utenti. Allo stesso modo, se il diagramma delle velocità operative V_{85} presenta – in un determinato tratto omogeneo – valori superiori al corrispondente valore della velocità ambientale V_{amb} calcolato, si rende necessaria una revisione del modello, pena l’incompatibilità tra la definizione di velocità ambientale, da un lato, e la previsione di un suo sistematico superamento, dall’altro.

Parte importante è, dunque, lo studio dei rapporti esistenti tra i modelli di previsione proposti, onde verificarne la *congruenza* nel tracciamento dei profili delle velocità operative V_{85} . Questo accertamento è mutato in obiettivo da perseguire laddove si preveda l’imposizione di opportune condizioni per “portare a congruenza” i modelli stessi.

D’altro canto, va ricordato che i modelli previsionali, tarati su dati monitorati direttamente camminando ai bordi delle strade, realizzano, comunque, una simulazione di quanto avviene nella realtà. Se il comportamento degli utenti o di una parte di essi è “irrazionale” le formulazioni dedotte dalle indagini sperimentali non possono che rispecchiare la situazione effettiva.

Pertanto, quando si parla di *coerenza* dei modelli, si fa riferimento ad un utente medio *razionale*, il quale nel percorrere gli elementi più vincolanti del tracciato, da cui subisce un condizionamento maggiore, adegua la propria velocità, riducendola.

Ovviamente, si tratta di una semplificazione del fenomeno che porta a non considerare innumerevoli singolarità nelle abitudini di guida e di condotta dei veicoli: tuttavia, rientrano nella scelta di uno specifico contesto territoriale e vengono mediate attraverso l’analisi di un campione di dimensioni consistenti.

Per le otto infrastrutture oggetto di studio si può effettuare un controllo dei risultati ottenuto dall'utilizzo dei modelli "in cascata" secondo la seguente successione:

- I. Per ogni tronco omogeneo, noto il tasso medio di curvatura CCR , si ricava dal modello di velocità ambientale il valore della velocità ambientale V_{amb}^* ;
- II. Per ciascuna curva, noti il raggio R ed il tasso medio di curvatura CCR del tronco omogeneo di appartenenza, si ricava dal modello di velocità operativa in curva il valore V_{85C}^* ; si ricorda che il modello di velocità operativa in curva è funzione composta della velocità ambientale: il valore della variabile indipendente velocità ambientale V_{amb} è quello stimato V_{amb}^* come variabile dipendente nello *step* precedente;
- III. Per ciascun rettilo, noti la lunghezza dell'elemento L_T , il raggio della curva che lo precede R_{Cp} ed il tasso medio di curvatura del tronco omogeneo su cui si trova CCR , si ricava dal modello di velocità operativa in rettilo il valore V_{85T}^* ; si ricorda che il modello di velocità operativa in rettilo è funzione composta della velocità operativa sulla curva precedente che a sua volta è funzione composta della velocità ambientale: il valore della variabile indipendente velocità operativa sulla curva precedente è quello stimato V_{85C}^* che a sua volta dipende dal valore stimato della velocità ambientale V_{amb}^* come variabili dipendenti negli *steps* precedenti.

Questa operazione è condotta in maniera agevole e consequenziale con l'ausilio di fogli di calcolo nei quali gli *input* sono le caratteristiche geometriche della strada come variabili esplicative indipendenti del dato di ingresso, ottenendo in *output* le grandezze dipendenti velocità in sequenza.

Le tabelle seguenti mostrano per una delle strade esaminate la SP312 i dati di *input* e di *output* ed il confronto finale tra le velocità calcolate e quelle reali, che si estrinseca nella determinazione degli scarti tra i valori di velocità suddetti.

Tabella 32 Applicazione dei Modelli in Sequenza: V_{amb} sulla S.P. 312.

Strada	CCR [gon/km]	$V_{amb, ril}$ [km/h]	V_{amb}^* [km/h]	$V_{amb}^* - V_{amb, ril}$ [km/h]
S.P. 312	47,156	87,9	94,9	7,0

Tabella 33 Applicazione dei Modelli in Sequenza: V_{85C} sulla S.P. 312.

Sezione	$V_{85C, ril}$ [km/h]	R [m]	CCR _{med} [gon/km]	V_{amb}^* [km/h]	V_{85C}^* [km/h]	$V_{85C}^* - V_{85C, ril}$ [km/h]
9	67,00	145	47,156	94.96	69.13	2.13
9	58,00	145	47,156	94.96	69.13	11.13
38	62,00	200	47,156	94.96	71.82	9.82
38	72,00	200	47,156	94.96	71.82	-0.18
55	41,00	50	47,156	94.96	54.90	13.90
55	44,60	50	47,156	94.96	54.90	10.30
62	75,00	600	47,156	94.96	76.92	1.92
62	71,00	600	47,156	94.96	76.92	5.92
64	69,70	300	47,156	94.96	74.31	4.61
64	66,95	300	47,156	94.96	74.31	7.36
68	64,00	100	47,156	94.96	65.08	1.08
68	69,00	100	47,156	94.96	65.08	-3.92
72	72,00	900	47,156	94.96	77.82	5.82
72	71,00	900	47,156	94.96	77.82	6.82
74	52,00	110	47,156	94.96	66.22	14.22
74	53,00	110	47,156	94.96	66.22	13.22
76	70,90	700	47,156	94.96	77.31	6.41
76	75,00	700	47,156	94.96	77.31	2.31
78	63,00	1100	47,156	94.96	78.15	15.15
78	69,00	1100	47,156	94.96	78.15	9.15

Tabella 34 Applicazione dei Modelli in Sequenza: V_{85C} sulla S.P. 312.

Sezione	$V_{85T, ril}$ [km/h]	L_T [m]	R_{Cp} [m]	CCR _{med} [gon/km]	V_{amb}^* [km/h]	V_{85Cp}^* [km/h]	V_{85T}^* [km/h]	$V_{85T}^* - V_{85T, ril}$ [km/h]
11	68,80	73	145	47,156	94.96	69.13	67.64	-1.16
52	61,00	622	50	47,156	94.96	54.90	79.71	18.71
59	72,00	492	50	47,156	94.96	54.90	77.14	5.14
60	73,00	492	600	47,156	94.96	76.92	88.30	15.30
66	73,00	138	300	47,156	94.96	74.31	75.09	2.09
66	69,00	138	100	47,156	94.96	65.08	70.41	1.41
70	71,00	82	100	47,156	94.96	65.08	66.41	-4.59
70	73,00	82	900	47,156	94.96	77.82	72.87	-0.13

Si comprende quanto l'aver escluso dal database dei rettifili quegli elementi che erano preceduti da curve cosiddette “anomale”, influisca sul corretto svolgimento della verifica: infatti, calcolando le V_{85C} anche sulle curve caratterizzate dalla presenza di condizionamenti locali, si ottengono valori non rispondenti alla situazione reale e quindi delle differenze eccessive, sia per il modello di curva, sia per quello di rettifilo.

Gli scarti tra velocità teoriche e velocità effettive si rappresentano con i diagrammi “di affidabilità”. Ovviamente, non ci sono variazioni per la V_{amb} che dipende dalla sola variabile CCR , mentre per i modelli V_{85C} e V_{85T} in curva e in rettifilo si ricavano i grafici seguenti: la differenza con gli analoghi diagrammi visti precedentemente sta nell'aver calcolato, questa volta, i valori teorici applicando i modelli “in cascata”.

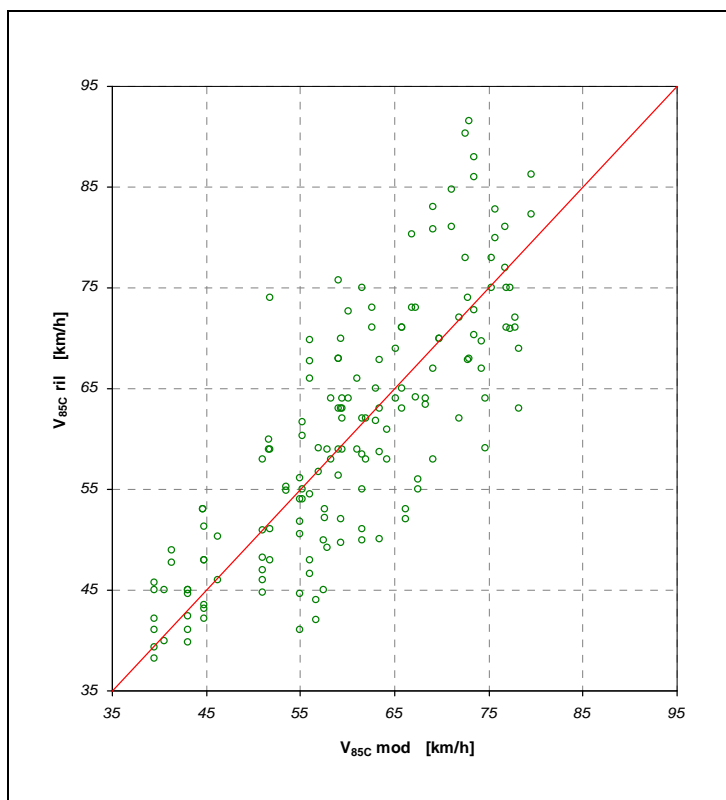


Figura 59 Affidabilità del Modello predittivo V_{85C} .

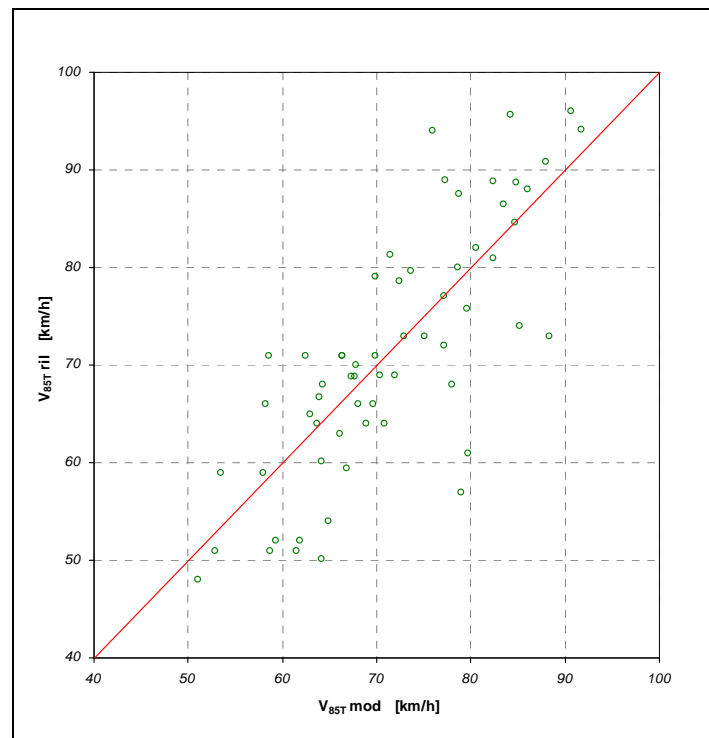


Figura 60 Affidabilità del Modello predittivo V_{85T} .

Tabella 35 Analisi degli Scarti tra Velocità Stimate con i Modelli e Velocità Reali.

Strada	Tronco omogeneo	V_{85C}		V_{85T}	
		μ	σ	μ	σ
S.P. 30b	I	-1,08	12,23	1,94	12,26
S.P. 52	I	-0,24	2,62	3,15	5,72
S.P. 312	I	6,86	5,29	4,60	8,20
S.P. 262	I	-1,22	5,66	-	-
S.S. 426	I	2,15	9,73	-4,42	6,10
S.S. 426	II	3,69	8,71	3,56	5,10
S.S. 166	I	0,09	4,79	3,35	6,17
S.S.103(I)	I	-3,95	7,08	-8,14	3,50
S.S.103(I)	II	-13,53	1,41	-	-
S.S.103(II)	I	-3,13	4,63	-2,33	3,23
S.S.103(II)	II	-7,34	1,29	-	-
TUTTE LE STRADE		-0,36	7,52	-0,37	7,75

L'analisi degli scarti, che sono variabili casuali, conduce ai valori di media e deviazione standard, i quali risultano mediamente più elevati e caratterizzati da una maggiore dispersione, ma non si rilevano variazioni significative.

La velocità ambientale è il valore massimo fra le velocità operative misurate nei rettilinei più lunghi o nelle curve di più ampio raggio appartenenti allo stesso tronco omogeneo ed è il valore di velocità desiderata, cioè quella velocità che i guidatori (o una rappresentativa percentuale di essi)

sceglie nel percorrere un tratto di strada in condizioni di flusso libero e buona visibilità, compatibilmente con le caratteristiche geometriche ed ambientali del tracciato.

Tale velocità si raggiunge in una o più sezioni di un tronco omogeneo, ma non viene superata.

Da questo assunto scaturisce l'analisi di compatibilità tra i modelli di velocità operativa con il modello di velocità ambientale. Il non superamento della V_{amb} da parte delle V_{85C} e V_{85T} induce ai valori calcolati con le rispettive relazioni analitiche matematiche sperimentali.

La congruenza tra i modelli si verifica "spontaneamente" e si impone con la restrizione del campo di applicabilità.

Nella fattispecie si confrontano i valori restituiti delle funzioni composte, o meglio, dalle relazioni simboliche.

Il modello di velocità ambientale su tronchi omogenei presenta una sola variabile geometrica indipendente CCR , mentre il modello di velocità operativa su curve circolari dipende da due variabili geometriche indipendenti il CCR ed $1/R$.

Il confronto può eseguirsi fissando un valore di tortuosità media, per il quale si avrà una determinata V_{amb} , ed ottenendo, al variare del raggio, i rispettivi valori di V_{85C} : ciò equivale a calcolare le velocità operative su curve aventi diverse caratteristiche geometriche ma appartenenti ad uno stesso tronco omogeneo.

Scelto un valore di CCR , la V_{amb} degenera in una retta orizzontale. Ogni curva delle seguenti figure rappresenta l'intersezione della superficie della funzione $V_{85C} = V_{85C}(1/R, CCR)$ con il piano $CCR = cost$.

È evidente che all'aumentare del CCR diminuiscono sia la V_{amb} che dipende da tale parametro con legge potenza, sia la V_{85C} che, pur dipendendo dal R , resta comunque proporzionale alla velocità ambientale.

Esplorando tutto il campo di esistenza della funzione (ossia facendo variare il CCR tra 9,6 e 589,3 gon/km) e considerando una variazione del raggio tra il valore minimo di 39 m e massimo di 2000 m utilizzati nelle elaborazioni, il modello fornisce velocità in curva sempre minori della velocità ambientale.

Pertanto i modelli sono reciprocamente compatibili fino al valore del CCR medio pari a 510 gon/km.

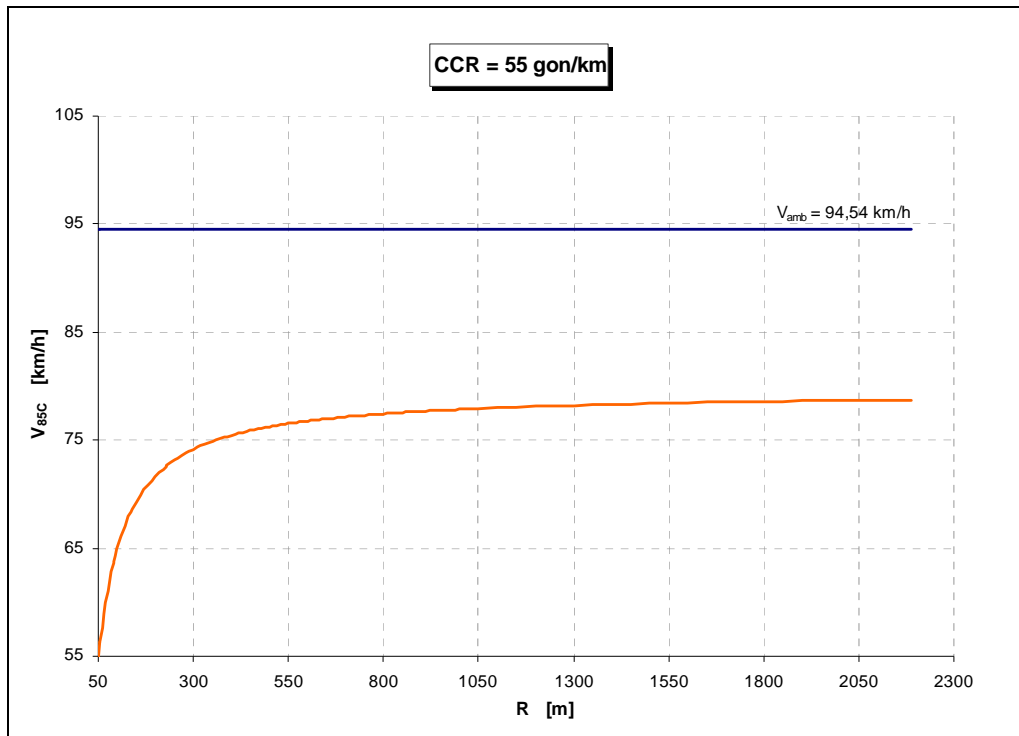


Figura 61 Confronto tra V_{85C} e V_{amb} al variare di R .

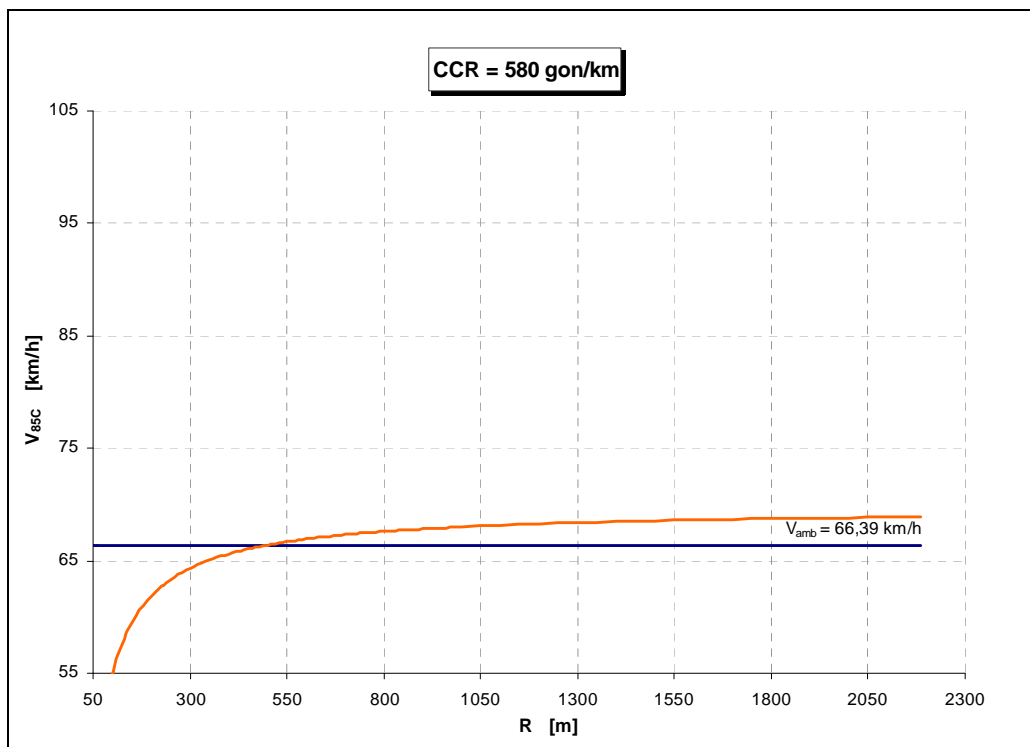


Figura 62 Confronto tra V_{85C} e V_{amb} al variare di R .

La verifica di congruenza tra il modello di velocità ambientale ed il modello di velocità operativa in rettifilo consiste nell'accertare che i valori ottenuti dal modello V_{85T} , ottenibili su un

tronco omogeneo di nota tortuosità, non superino il valore ottenuto dal modello V_{amb} . Il confronto si esegue tra il valore assunto per un fissato CCR ed i valori assunti dalla funzione composta. Operativamente si procede in maniera simile a quanto fatto in precedenza, assegnando un CCR – cui corrisponde una data velocità ambientale – e determinando la V_{85T} : in questo caso, però, bisognerà far variare le grandezze R_{Cp} e L_T per ottenere la velocità operativa.

I diagrammi bidimensionali sono riportati nelle figure seguenti per due diversi valori del CCR . La V_{amb} ha, ovviamente, valore costante, mentre la V_{85T} varia sia con la lunghezza che con il raggio della curva precedente ed ogni curva è l'intersezione della superficie $V_{85T} = V_{85T}(CCR, L_T)$ con il piano $CCR = cost.$, fissato il valore R_{Cp} . Per ogni figura sono tracciate le curve $L_T - V_{85T}$ a $R_{Cp} = 40$; 100; 250; 500; 1000; 2187 m (intervallo dei raggi utilizzati per la calibrazione del modello di V_{85C}); le curve tratteggiate sono riferite ai limiti inferiore e superiore del R e delimitano il *fuso* entro il quale sono comprese le altre.

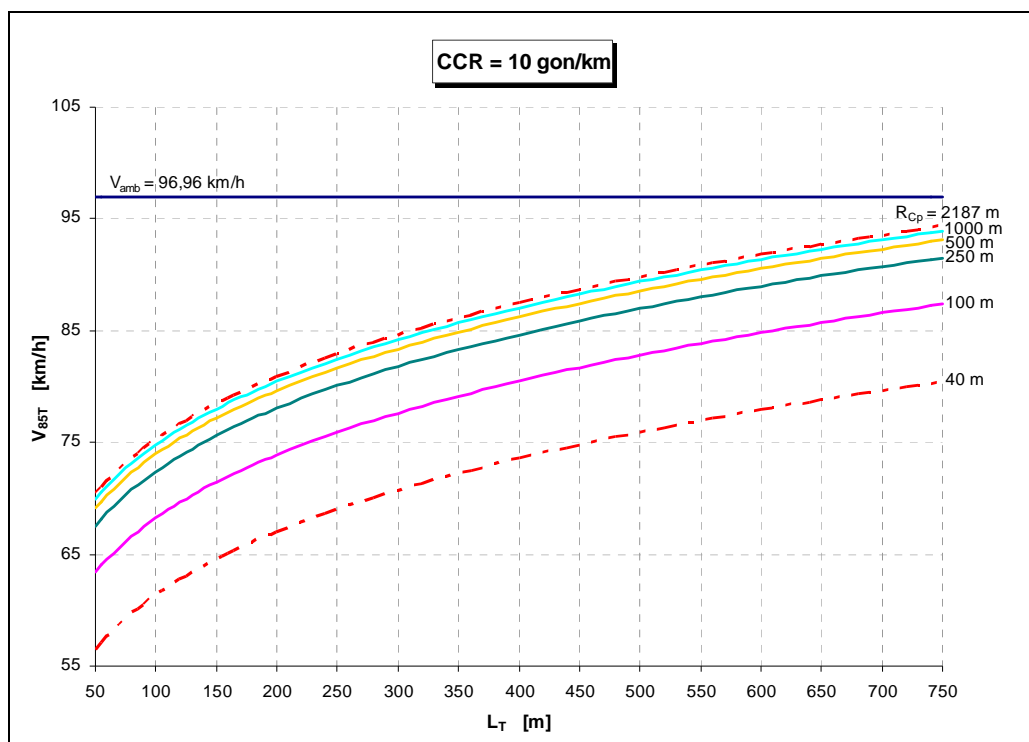


Figura 63 Confronto tra V_{85T} e V_{amb} al variare del R_{Cp} .

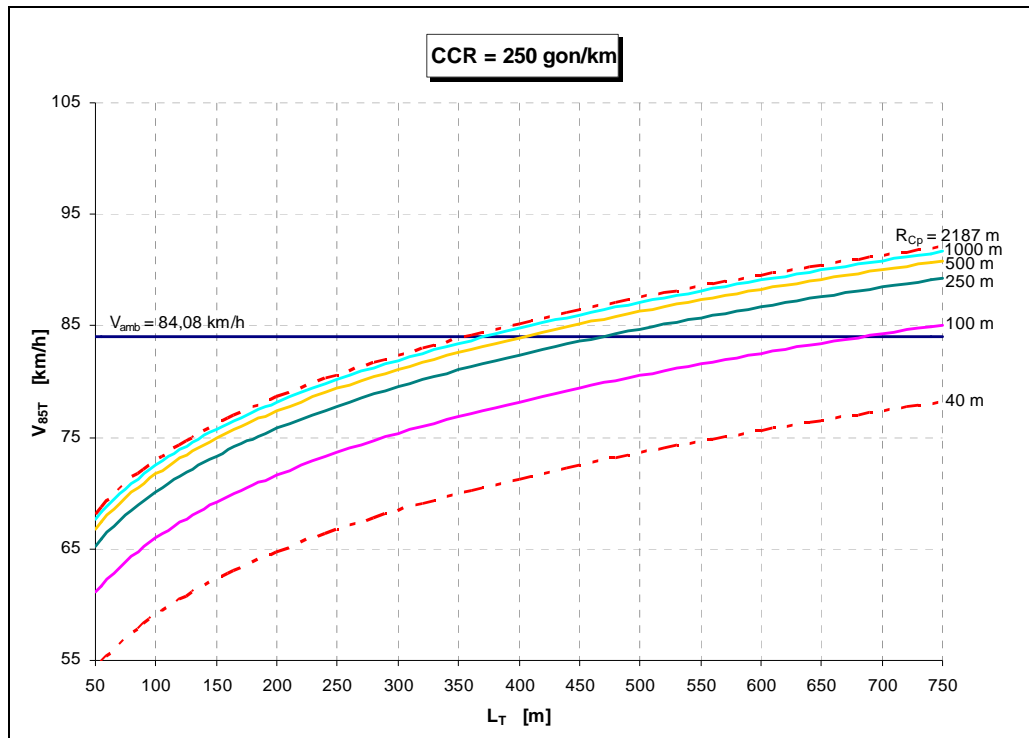


Figura 64 Confronto tra V_{85T} e V_{amb} al variare del R_{Cp} .

Le stesse curve si tracciano attribuendo diversi valori alla V_{85Cp} : in tal caso bisogna avere solo l'accortezza di verificare che il modello di curva ammetta effettivamente tali valori, cioè che esista un valore di R tale che l'applicazione del modello dia come risultato la V_{85Cp} prescelta.

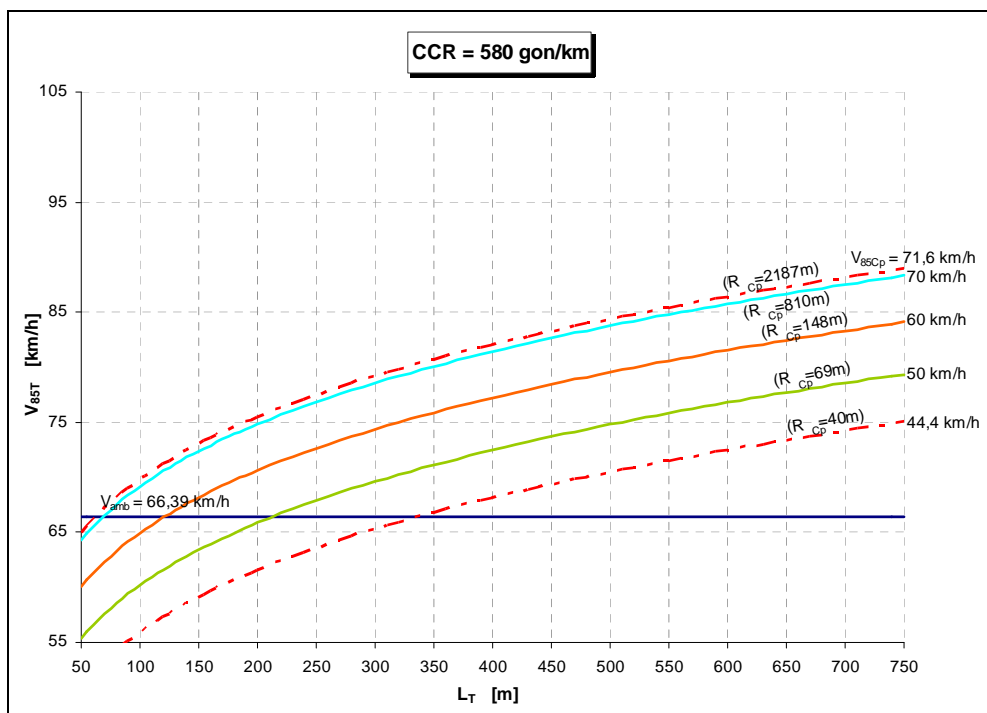


Figura 65 Confronto tra V_{85T} e V_{amb} al variare del R_{Cp} .

Le curve $L_T - V_{85T}$ sono caratterizzate da uno stesso valore di V_{85Cp} e non variano al variare del CCR . La retta della V_{amb} all'aumentare del CCR medio si sposta sempre più in basso e tende ad intersecare le curve.

In entrambi i diagrammi si nota che anche per tortuosità non elevate esistono valori del raggio della curva precedente e della lunghezza del rettifilo per i quali la velocità operativa sull'elemento supera la velocità ambientale.

I valori di V_{85T} risultano tanto maggiori della V_{amb} quanto maggiore è il CCR medio del tronco omogeneo in cui il rettifilo è inserito; soltanto per valori molto piccoli di CCR ($10 \div 25$ gon/km) questa evenienza non si verifica mai, e cioè tutte le curve si trovano al di sotto della retta $V_{amb} = cost.$

Infatti, su un tronco omogeneo caratterizzato da poche deviazioni angolari di piccola entità rispetto al suo sviluppo, la velocità che i guidatori desiderano mantenere è elevata, ed essa non può essere raggiunta se non sugli elementi rettilinei di elevata lunghezza, quindi al di fuori dell'insieme di esistenza della variabile L_T .

Quando, al contrario, il tratto omogeneo ha un andamento molto tortuoso gli utenti mantengono velocità basse. In tal caso è più probabile che esista un rettifilo di lunghezza sufficiente a raggiungere la velocità desiderata, specialmente se esso è preceduto da una curva di ampio raggio percorsa a velocità elevata.

Queste osservazioni, però, non sono in grado di sanare l'incongruenza che si genera sul piano applicativo quando i modelli predittivi di velocità operativa in rettifilo danno valori di velocità maggiori della velocità ambientale.

Non potendo evitare quest'eventualità si impone la condizione:

$$V_{85T}(CCR, R, L_T) \leq V_{amb}(CCR)$$

Tutte le volte che la V_{85T} supera la V_{amb} su un qualsiasi tratto omogeneo, il valore da adottare nella costruzione del profilo delle velocità operative è il secondo.

La disuguaglianza comporta una ridefinizione del criterio di riconoscimento dei rettifili dipendenti; invero, il suo verificarsi in senso stretto equivale proprio a dichiarare la dipendenza del rettifilo, ossia il mancato attingimento, sul rettilineo in esame, della velocità desiderata. Per distinguere i rettifili dipendenti da quelli indipendenti era stato fissato un valore "di soglia" della lunghezza di 750 m; la specificazione e la calibrazione dei modelli previsionali ed i reciproci confronti hanno evidenziato, invece, che il superamento della velocità ambientale è causato anche da altri fattori, quali la tortuosità del tronco omogeneo di appartenenza e la velocità operativa della

curva precedente. Si può sostenere, dunque, che il limite di dipendenza per un rettifilo non corrisponde ad un valore fissato della sua lunghezza L_T , ma che quest'ultima può variare, da un elemento dipendente ad un altro, in base ai valori assunti dai parametri CCR e V_{85Cp} .

Le valutazioni innanzi espresse e le conclusioni cui si è giunti, sono state tradotte graficamente negli abachi riportati di seguito. Il primo riproduce la variazione della massima lunghezza dei rettifili dipendenti L_{Td} in funzione del CCR medio e del raggio di curvatura immediatamente precedente. Ogni curva dell'abaco rappresenta, cioè, il luogo dei punti per i quali, in corrispondenza dell'assegnato CCR ed al variare del raggio dell'elemento curvilineo precedente (quantità in ascissa), risulta $V_{85T} = V_{amb}$. Il grafico denota una diminuzione della massima lunghezza "di dipendenza" all'aumentare sia della tortuosità che del raggio, in accordo con quanto è stato prima affermato. Il secondo abaco mostra lo stesso tipo di correlazione, ma per portare in conto l'influenza della curva precedente fa ricorso alla variabile cinematica V_{85Cp} .

Per il significato che è attribuito ad essi, ciascuna delle curve costituenti gli abachi separa la zona in cui la V_{85T} supera la V_{amb} (area al di sopra della curva), dalla zona in cui è verificata strettamente la disuguaglianza (area al di sotto della curva): gli abachi, pertanto, contribuiscono a definire in maniera immediata e graficamente valida i limiti superiori delle lunghezze attribuibili ai rettifili dipendenti per l'applicazione del modello.

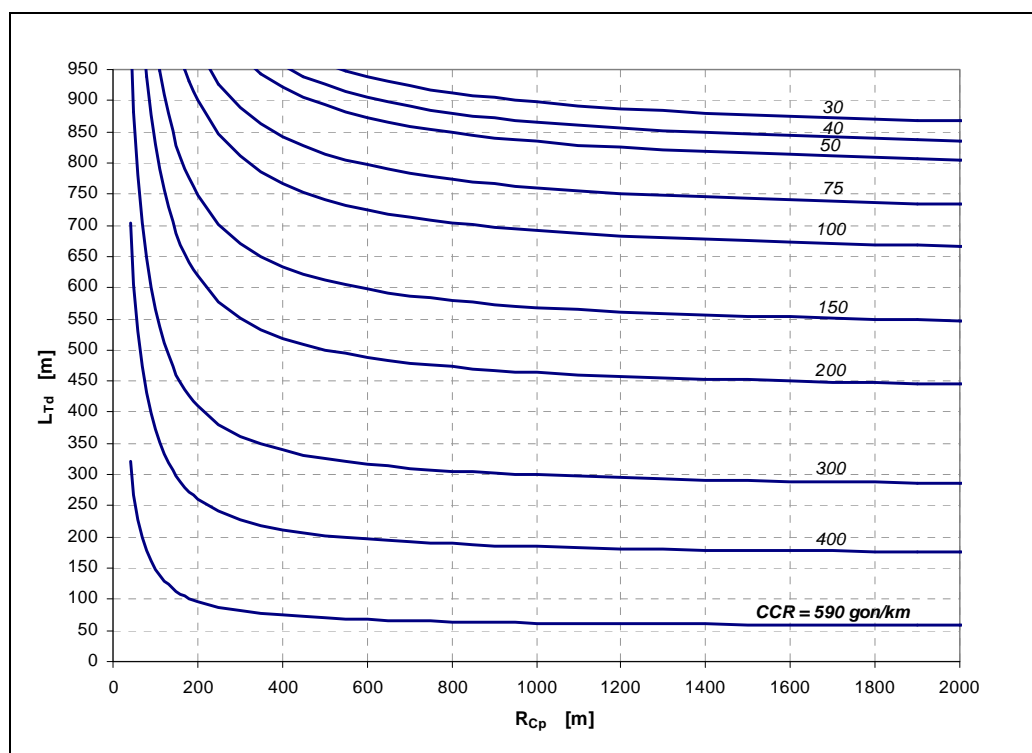


Figura 66 L_{Td} in funzione di R_{Cp} .

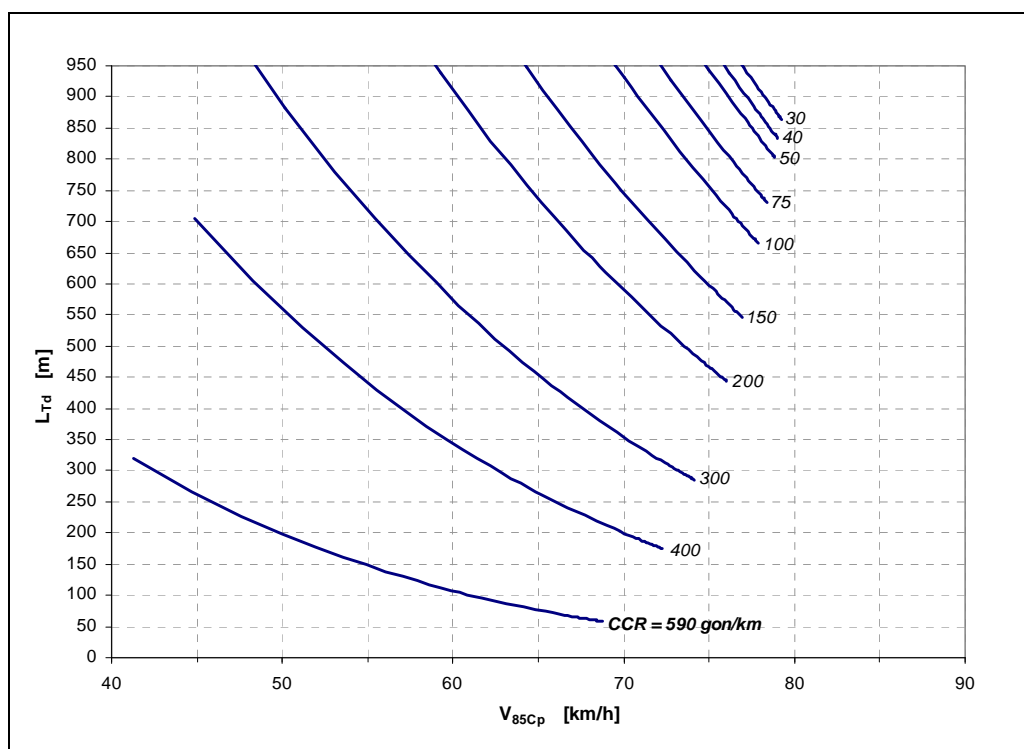


Figura 67 L_{Td} in funzione di V_{85Cp} .

Le curve circolari sono gli elementi più impegnativi del tracciato planimetrico delle strade oggetto di studio. Nel percorrerle, infatti, gli utenti devono modificare la propria traiettoria subendo l'effetto dell'accelerazione centripeta, che si traduce nella comparsa di una forza centrifuga destabilizzante per il veicolo; inoltre la curvatura, specie quando è molto elevata, limita in maniera apprezzabile la visibilità del tratto stradale successivo.

Solitamente i guidatori reagiscono a tali stimoli riducendo la velocità di marcia: per questa ragione è stato possibile correlare abbastanza agevolmente le velocità operative realizzate in curva alla curvatura o a parametri rappresentativi della deviazione angolare dell'elemento.

In rettilineo, al contrario, gli utenti non patiscono dei veri condizionamenti strettamente legati alla geometria dell'elemento, ma piuttosto delle limitazioni alle massime velocità che possono attingere; i parametri che maggiormente incidono sulla velocità operativa praticata sono la lunghezza dell'elemento e quella realizzata sulla curva che lo precede immediatamente.

Nell'attuale normativa italiana sulla progettazione geometrica e funzionale delle strade è prevista la redazione del diagramma delle velocità per “la verifica della correttezza della progettazione”. Le velocità in questione sono quelle di progetto ed il controllo mira ad accertare che tra due elementi consecutivi lo scarto ΔV_p sia contenuto entro prefissati limiti.

La costruzione del diagramma viene effettuata ponendo che le curve di raggio $R < R_{2,5}$ siano percorse, per tutto il loro sviluppo, a velocità costante e dipendente dal raggio, dalla sopraelevazione e dalla categoria funzionale e tendente, in alcuni casi, al limite inferiore dell'intervallo di velocità di progetto.

Tanto i modelli teorici semplificati quanto quelli sperimentali si basano sul presupposto che la velocità adottata dai guidatori lungo gli elementi planimetrici curvilinei sia non superiore a quella che si realizza in rettilineo, dove il minor grado di restrizione consente loro di procedere in maniera più celere, fino al limite superiore della velocità desiderata.

Nell'analisi dei comportamenti di guida, dunque, è considerata coerente una condotta che si esplicita nella riduzione della velocità in prossimità delle curve ed in un suo aumento lungo i rettifili, con il verificarsi di variazioni nelle zone cosiddette di transizione: e cioè, non conoscendo la reale distribuzione delle velocità, si suppone che le scelte operate dall'utente siano fedeli alla logica di un decisore "razionale", caratterizzato da una percezione ordinaria dei vincoli imposti dalla geometria stradale.

Quest'ipotesi chiarisce il senso della verifica di compatibilità tra i modelli di velocità operativa in curva ed in rettilineo. Si tratta appunto di accertare che sia verificata la disuguaglianza:

$$V_{85T}(V_{85Cp}, L_T) \geq V_{85Cp}$$

dove il termine al secondo membro è la velocità operativa della curva che precede il rettilineo, la quale è una delle variabili del modello.

Assegnando un valore alla V_{85Cp} , la disuguaglianza diventa una funzione della sola variabile L_T , che è possibile rappresentare graficamente in un piano effettuando il confronto tra le velocità in rettilineo ed in curva mediante la Figura 68 che segue.

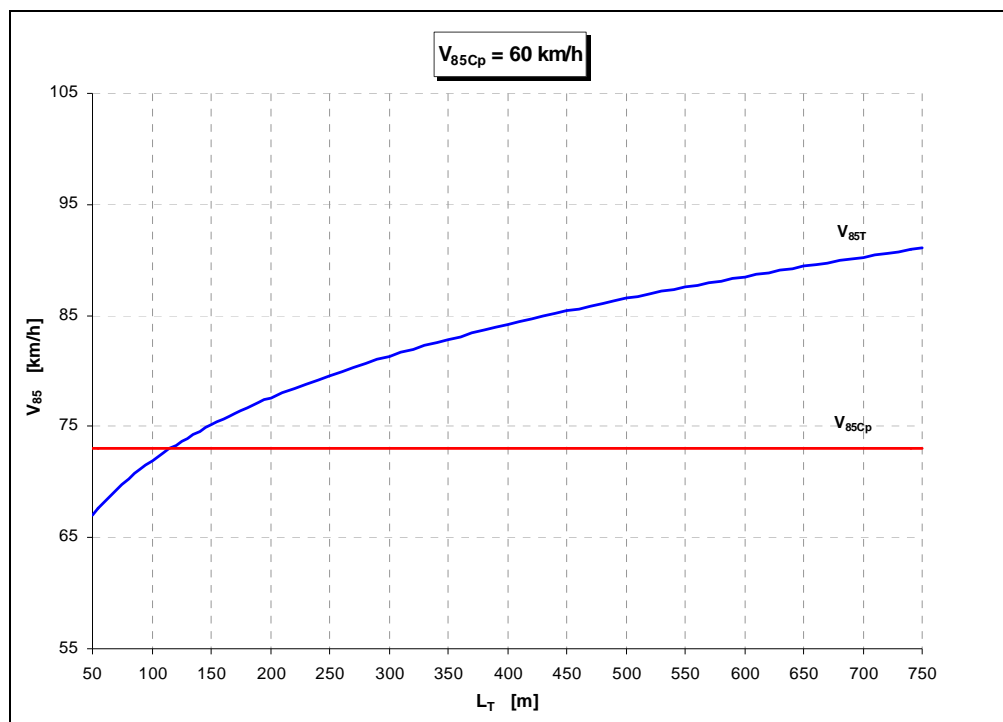


Figura 68 Confronto tra V_{85T} e V_{85Cp} .

La curva delle V_{85T} rappresenta l'intersezione della superficie dello spazio \mathcal{R}^3 di equazione $V_{85T} = V_{85T}(V_{85Cp}, L_T)$ con il piano $V_{85Cp} = 60$ km/h.

Il diagramma denota la presenza di una zona in cui la curva di V_{85T} si trova al di sotto della retta di velocità V_{85Cp} e quindi non verifica la disuguaglianza. Ma avendo considerato una sola variabile indipendente, esso non chiarisce il rapporto esistente fra la velocità prescelta (60 km/h) ed il raggio della curva su cui si verifica. Esiste effettivamente un'ampiezza R_{Cp} tale che la velocità in curva assuma il valore fissato; inoltre, proprio perché la V_{85Cp} è considerata come semplice variabile piuttosto che come funzione, non appare alcun legame con il CCR del tronco omogeneo nel quale il rettilo è inserito.

Pertanto, nel quadro di un confronto più generale non solo tra i valori assunti dalle singole funzioni, ma anche fra i rispettivi insiemi di esistenza, si è ritenuto utile il ricorso ad un'altra forma di rappresentazione, dove vengono esplicitate tutte le variabili indipendenti.

Il risultato è stato la costruzione di nuovi diagrammi che seguono. Ciascuno di essi è relativo ad un assegnato valore di CCR, in cui la velocità operativa del rettilo viene fatta variare in funzione sia della lunghezza che dell'ampiezza del raggio della curva precedente: in tal modo si tiene conto dell'influenza ambientale dovuta al tronco omogeneo sul quale è situato l'elemento.

I grafici sono di immediata interpretazione, perché riproducono per diversi valori della V_{85Cp} gli stessi andamenti mostrati in figura, ed evidenziano l'esistenza di tratti in cui la velocità in curva

supera quella del rettifilo. Questa circostanza è più frequente nel caso di tracciati a basso grado di curvatura, dove la velocità in curva, a parità di raggio, assume valori più elevati.

Al crescere del CCR , invece, la velocità operativa in curva si riduce e diminuisce altresì il “rischio” che la funzione fornisca valori minori.

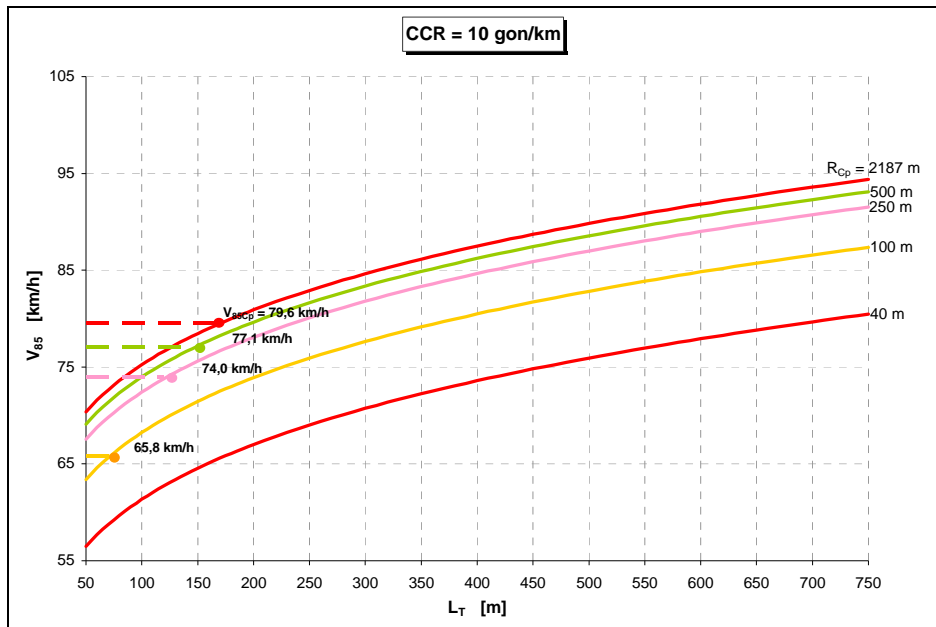


Figura 69 Confronto tra V_{85T} e V_{85C} in funzione di R_{cp} .

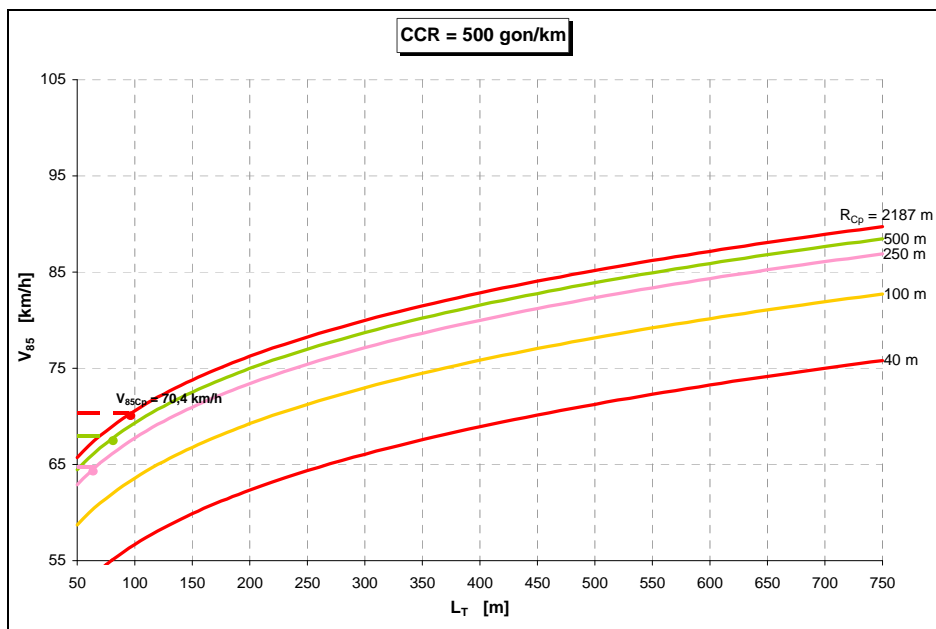


Figura 70 Confronto tra V_{85T} e V_{85C} in funzione di R_{cp} .

Invero, le indagini sperimentali hanno rivelato che su alcuni rettifili l'85° percentile della distribuzione della velocità risulta essere effettivamente più basso rispetto a quello che si ottiene dalla distribuzione nella curva che lo precede.

Le cause di un simile comportamento *irrazionale* non sono sempre individuabili con facilità, essendo legate alla “lettura” della strada da parte degli utenti che spesso è fortemente penalizzata dall'assenza di un sufficiente coordinamento plano-altimetrico del tracciato.

D'altra parte, qualsiasi motivazione venga addotta a chiarimento di questo fenomeno sulle strade oggetto di studio, non consente di trarre conclusioni di generale validità.

Per ogni valore di CCR e di R_{Cp} e di L_T si fissa un limite inferiore per la funzione:

$$V_{85T} = V_{85T}(V_{85Cp}, L_T) = V_{85T}(CCR, R, L_T)$$

Questa soluzione comporta che le curve V_{85T} tracciate nei diagrammi precedenti devono essere “tagliate” laddove le loro ordinate risultano inferiori a quelle della V_{85Cp} , calcolate da modello per un fissato valore di raggio ed una data tortuosità.

Si hanno diagrammi come quello rappresentato nella Figura 71 ottenuto da quello plottato in precedenza e imponendo i limiti inferiori per le velocità in rettifilo.

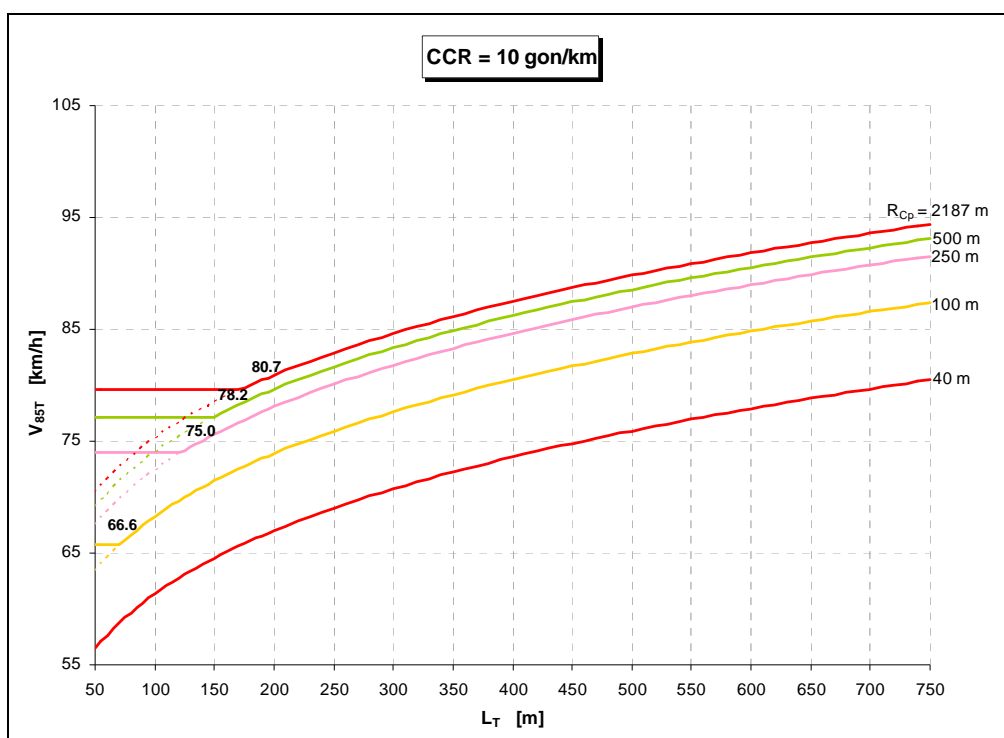


Figura 71 Limiti inferiori di V_{85T} .

In precedenza del presente lavoro di ricerca scientifica analitico - sperimentale è stato possibile associare alla disuguaglianza $V_{85T} < V_{amb}$ la nozione di dipendenza del rettifilo dalle curve tra le quali è interposto.

In questo caso, il verificarsi della *percezione* del rettifilo da parte degli utenti è ineludibile se è interposto tra due curve e non viene “avvertito” in quanto tale; esso è un elemento di raccordo ed i guidatori che vi transitano possono operare anche delle riduzioni di velocità.

La lunghezza dei rettifili percepibili come tali è fissata in 50 m durante la fase di organizzazione del database; diversamente, le analisi comparative svolte portano a concludere che la lunghezza per cui un rettifilo viene effettivamente percepito come tale – se si prende come riferimento il comportamento sulla curva immediatamente precedente, supposta esistente – dipende dalla tortuosità del tronco di appartenenza e dal raggio della curva precedente.

Questi risultati trovano un compendio nei due abachi riportati nel seguito, dove ogni curva rappresenta il luogo dei punti per i quali si verifica l'uguaglianza $V_{85T} = V_{85Cp}$, e quindi separa la zona del piano in cui il rettifilo è percepito come tale (semipiano al di sopra della curva) da quella in cui non lo è (semipiano al di sotto della curva). Essi consentono d'individuare per via grafica i limiti inferiori delle lunghezze dei rettifili dipendenti da impiegare nel rispettivo modello.

L'abaco non varia con il *CCR* in quanto ogni fissata velocità operativa sulla curva precedente V_{85Cp} risulta funzione del solo parametro L_T . Lo stesso riporta valori della lunghezza anche inferiori ai 50 m che possono utilizzarsi nell'applicazione del modello di V_{85T} qualora si accettino le estrapolazioni.

In precedenza si è detto che la disuguaglianza ed in particolare la stretta maggioranza viene assunta come condizione *necessaria* affinché il rettifilo sia percepito come tale.

In effetti, ritenendo che la soglia di percezione di un rettifilo sia legata al superamento della velocità praticata sugli elementi curvilinei tra i quali è interposto, bisogna esaminare la condizione per entrambe le curve, ossia tanto per quella che precede quanto per quella che segue il rettifilo.

Questo problema è soltanto apparente poiché la verifica della disuguaglianza con l'ausilio degli abachi può essere eseguita nei due sensi di marcia, ottenendo un confronto della velocità in rettifilo con quelle delle curve tra cui è inserito, sia pure separatamente per direzione.

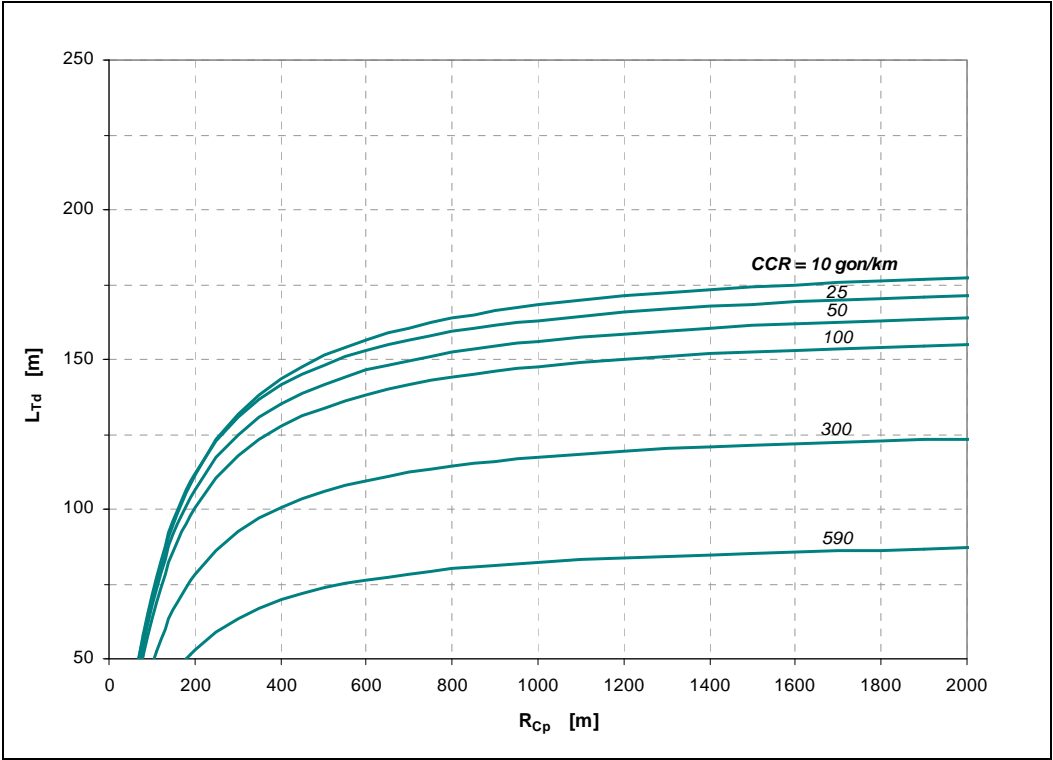


Figura 72 L_{Td} in funzione di R_{Cp} .

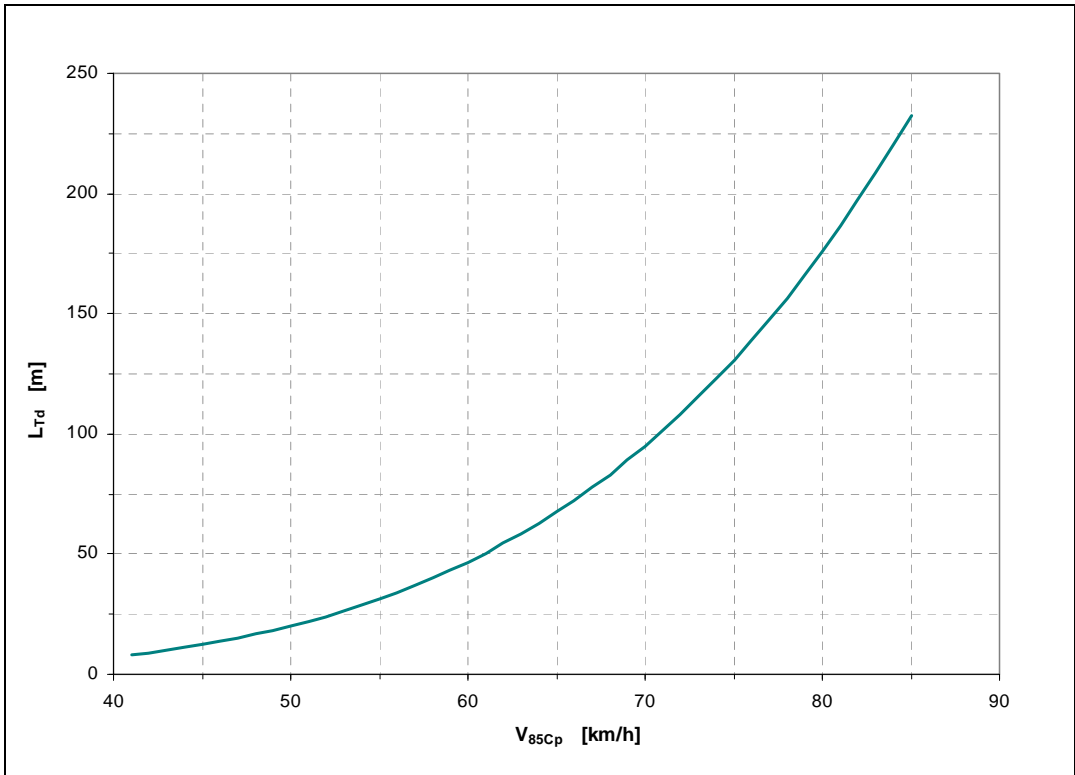


Figura 73 L_{Td} in funzione di V_{85Cp} .

9. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI DELLA RICERCA

Il presente paragrafo riprende i principali risultati ottenuti nel corso della ricerca ed analizza i possibili futuri sviluppi della ricerca.

Il diagramma delle velocità operative è indicato in letteratura come migliore strumento di verifica del “Design consistency” di un tracciato stradale in quanto misura del rispettivo grado di congruenza con le aspettative di regolarità di marcia e sicurezza di un utente.

L’inadeguatezza della velocità di progetto, nel dimensionamento degli elementi geometrici di un tracciato, è ampiamente dimostrata da svariate analisi sperimentali rivolte allo studio delle correlazioni tra caratteristiche geometriche di un’infrastruttura e comportamento di guida di un utente.

Numerose ricerche hanno chiaramente evidenziato che la velocità operativa (V85) è quella che in miglior misura rappresenta il reale comportamento dei conducenti.

In considerazione di ciò, sono stati formulati dei modelli predittivi delle velocità operative.

L’obiettivo del lavoro è quello di studiare il comportamento di guida in relazione alle proprietà dell’ambiente stradale attraversato, su strade extraurbane a due corsie e carreggiata unica, finalizzando la ricerca alla costruzione di diagrammi delle velocità, attraverso:

la redazione di modelli matematici che siano in grado di prevedere la velocità operativa praticata sull’infrastruttura;

la validazione di tali modelli su un campione differente da quello di taratura, al fine di valutare in maniera accettabile la riproduzione del fenomeno che s’intende simulare;

il controllo della coerenza tra i singoli modelli;

la stima dei tassi di accelerazione e decelerazione e della lunghezza dei tronchi di transizione.

Considerando i dati di velocità relativi ad 8 infrastrutture viarie, i rilievi strumentali forniscono un congruo numero d’informazioni dalle quali sono estratte, mediante apposite procedure di trattamento e filtraggio dei dati, le grandezze statisticamente più rilevanti: tali parametri sono confluiti in database opportunamente strutturati in vista della loro successiva analisi ed elaborazione numerica.

Da un'attenta lettura della produzione scientifica recente emerge che la velocità di percorrenza è il parametro più diffusamente impiegato per rappresentare il comportamento del conducente rispetto all'ambiente stradale che egli si trova ad attraversare.

La disponibilità di strumenti atti a prevedere le velocità praticate dai guidatori costituisce un indubbio vantaggio, sia nell'ambito progettuale sia nel campo degli interventi di adeguamento delle infrastrutture esistenti.

In entrambi i casi, infatti, l'obiettivo è rendere il tracciato stradale congruente con le aspettative degli utenti, evitando o correggendo le situazioni di disomogeneità nella successione degli elementi stradali, che costituiscono uno dei fattori di sorpresa per l'utente e rappresentano una forte concausa delle condotte di guida errate o pericolose.

L'Ufficio Trasporti della Provincia di Salerno fin dal 1999 ha avviato un'azione di monitoraggio periodico della rete stradale suburbana ed extraurbana, finalizzata alla programmazione di interventi per il riassetto della viabilità provinciale e per il miglioramento della sicurezza stradale. Abbinando alle finalità dell'Ente gli obiettivi specifici della ricerca, sono state progettate, di concerto con il Centro Provinciale di Monitoraggio Sicurezza Stradale, due successive campagne di rilevamento strumentale, realizzate su strade extraurbane a carreggiata unica e doppio senso di marcia.

Le indagini sperimentali dimostrano che le velocità adottate dagli utenti non risultano conformi a quelle di progetto, mentre i limiti di velocità presenti su talune infrastrutture vengono spesso abbondantemente superati. I dati acquisiti nel corso delle campagne consentono di costruire un database utilizzabile per lo studio e l'implementazione di modelli previsionali delle velocità operative: è opinione largamente condivisa che sviluppando modelli siffatti si possa contribuire al miglioramento della qualità della circolazione e, in definitiva, alla riduzione del problema dell'incidentalità, che causa ogni anno ingenti danni umani ed economici.

L'analisi dei dati campionari conferma la notevole dipendenza delle velocità operative dalle caratteristiche geometriche e funzionali dell'elemento sul quale si verificano.

Quest'evidenza empirica, anche alla luce dello stato attuale della ricerca, permette di indirizzare gli sforzi verso l'elaborazione di modelli predittivi distinti per ciascuno degli elementi che compongono il tracciato planimetrico.

La fase dell'elaborazione analitica dei dati sperimentali evidenzia i principali risultati conseguiti. Infatti, saranno presentate separatamente per ogni tipologia di elemento del tracciato le caratteristiche salienti dei modelli di velocità ambientale ed operativa, effettuando una breve disamina conclusiva sui rapporti esistenti tra le formulazioni proposte.

Attraverso l'impiego di metodologie statistiche d'interpretazione dei dati campionari è possibile individuare le variabili indipendenti che concorrono alla formazione della velocità operativa, riconoscendo tra l'altro le particolari capacità predittive della cosiddetta velocità ambientale (speed environment).

Le fasi seguenti, di specificazione delle espressioni formali e calibrazione dei loro parametri, portano alla formulazione di modelli previsionali delle velocità operative sulle curve e sui rettifili e di un modello per la stima della velocità ambientale lungo i tronchi omogenei.

Le relazioni empiriche proposte sono oggetto di una verifica simultanea, allo scopo di studiare i risultati ottenibili durante la loro applicazione sequenziale.

La coerenza tra i valori forniti dai differenti modelli previsionali rappresenta, infatti, il requisito essenziale per la creazione di un corretto profilo delle velocità operative e, in definitiva, per la valutazione dell'omogeneità di un tracciato stradale.

Successivamente si preferisce adottare una procedura idonea per la fase di validazione dei modelli di previsione delle velocità operative in curva e rettilineo. Tale operazione mira alla valutazione dell'accuratezza che coinvolge i parametri interessati nella regressione dei modelli per verificarne l'idoneità nella simulazione delle reali circostanze che prendono vita in sito.

In particolare, attraverso l'utilizzo di parametri statistici sintetici e strumenti di controllo, si testa la validità dei modelli tarati su un campione differente da quello di taratura in quanto in possesso di caratteristiche simili al campione di taratura.

Le misure di velocità inoltre sono finalizzate al tracciamento di diagrammi continui lungo i tronchi di transizione rettilineo – curva – rettilineo dai quali sono desunte:

- le lunghezze degli stessi tratti;
- la ripartizione percentuale di questi tra curve e rettifili; nonché
- i tassi di accelerazione e decelerazione medi.

La conquista di questi risultati concede l'opportunità di calibrare e validare idonei modelli di previsione delle velocità nelle zone di transizione e consente di costruire un profilo di velocità completo che cerca di riflettere la reale percezione del tracciato da parte dell'utente.

Alla luce di quanto è stato detto, si arguisce che l'elaborazione di modelli previsionali della velocità operativa riveste un crescente interesse nel campo delle infrastrutture stradali. Si tratta di un'operazione notevolmente complessa, che dev'essere supportata da un cospicuo numero d'informazioni sperimentali, opportunamente scelte per il conseguimento degli scopi proposti.

L'ampliamento degli archivi di dati nel corso del tempo ha permesso di raggiungere un progressivo perfezionamento delle relazioni empiriche, che, rappresentando il risultato di un processo inferenziale di regressione su campioni spesso molto ampi, tendono ad assumere una validità generale, non legata alla singolarità delle specifiche strade monitorate.

L'opportunità di accrescere ulteriormente le basi di dati disponibili, grazie all'inserimento delle misure di traffico realizzate nell'anno 2007, lascia prevedere diversi potenziali sviluppi:

incrementare la casistica riguardante i tronchi omogenei ed approfondire il problema della formazione della velocità ambientale;

validare ulteriormente ed in progress i modelli proposti, cioè stabilire con metodologie statistiche se i valori da essi ottenibili approssimano in misura soddisfacente i dati sperimentali relativi alle altre strade oggetto di future osservazioni e rilievi, che man mano contribuiscono all'accrescimento ed all'implementazione del database di riferimento dei modelli, ovvero se bisogna porre ulteriori restrizioni alla loro applicabilità;

eseguire analisi particolareggiate, ad esempio effettuando una separazione fra strade statali e provinciali, per tener conto dell'eventuale diversità di comportamento degli utenti e di caratteristiche geometrico - funzionali sui tipi di strade.

La dimensione del campione, dunque, riveste una grande importanza non solo nell'estensione del campo di validità dei modelli, ma anche per le implementazioni riguardanti la validità e l'efficacia delle formulazioni proposte in relazione all'abbattimento del fenomeno di incidentalità stradale ed alla sicurezza in genere della circolazione sulle infrastrutture di trasporto terrestri a guida libera.

Tuttavia, l'intero processo analizzato non riesce a cancellare il carattere "locale" delle elaborazioni. Infatti, il contesto territoriale nel quale i dati vengono acquisiti non solo concorre alla formazione di alcune caratteristiche ambientali delle infrastrutture, ma riflette anche specifici atteggiamenti ed abitudini di guida dei conducenti.

A completamento degli studi svolti finora, sarebbe utile approfondire l'analisi del comportamento dell'utente lungo le zone di transizione, con l'obiettivo d'individuare un procedimento sperimentale per la stima dei tassi di accelerazione e di decelerazione, così da giungere al perfezionamento del diagramma delle velocità operative sull'intero tracciato stradale.

L'auspicio maggiore, da parte di quanti operano in questo campo della ricerca e anche dello scrivente, è che i risultati conseguiti e le tecniche messe a punto trovino un'adeguata diffusione, riscuotendo in speciale modo l'interesse degli Enti gestori delle infrastrutture viarie. Tali condizioni costituirebbero il principio per l'adozione di iniziative come quelle intraprese tra la Provincia di

Salerno – Centro di Monitoraggio Sicurezza Stradale, diretto dall'ing. Giovanni Coraggio, e l'Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti “Luigi Tocchetti”, diretto dal prof. ing. Renato Lamberti, e, soprattutto, per la nascita di fattive collaborazioni tra Enti, Università ed Istituti di ricerca, nel comune intento di migliorare la qualità dell'offerta di trasporto e, soprattutto, di garantire una sempre maggiore sicurezza nella circolazione stradale.

10. RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia sentitamente il professor ingegner Renato Lamberti, maestro di inestimabile saggezza, per le linee guida fornite durante l'intero lavoro di ricerca, il professor ingegner Raffaele Mauro per i preziosissimi consigli forniti e artefice intellettuale dei miglioramenti apportati al lavoro e l'ingegner Gianluca Dell'Acqua, per aver stimolato le idee di ricerca.

Inoltre un affettuoso ringraziamento va all'ingegner Giovanni Coraggio, Dirigente del Centro di Responsabilità Trasporti della Provincia di Salerno, ed ai colleghi del Centro Provinciale di Monitoraggio della Sicurezza Stradale per il supporto fornito durante le fasi operative del presente documento.

11. BIBLIOGRAFIA

AA. VV. *Conteggi di traffico sulla viabilità provinciale extraurbana e suburbana – Biennio 2003-2004*. Provincia di Salerno – Settore Ambiente e Territorio – Ufficio Trasporti e Trasporto Pubblico Locale, Vietri sul Mare (SA), gennaio 2005, su www.sicurezzastradalesalerno.it.

AA. VV. *Design Standard TD 9/93 Highway Link Design*. Department of Transport, London, 1993.

AA. VV. *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*. D.M. 05/11/2001. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2001, pubbl. su G.U. n. 3 del 4 gennaio 2002.

AA. VV. *Norme per interventi di adeguamento di strade esistenti*. Commissione per la predisposizione di nuove norme per gli interventi di adeguamento delle strade esistenti, Bozza al Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 25 aprile 2005.

AA. VV. *Nuovo Codice della Strada*. D.Lgs. 30-04-1992, n. 285. Ministero dei Trasporti e delle Infrastrutture, 1992.

AA. VV. *Richtlinien für die Anlage von Strassen. Forschungsge-sellschaft für Strassen und Verkehrswesen Linienführung RAS-L*, Bonn, 1995.

AA. VV. *Rural road design: guide to the geometric design of rural roads*. Austroads, Sydney, 1997.

AA. VV. *Statistica degli incidenti stradali – anno 2006*. Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), Servizio Giustizia, in collaborazione con Automobile Club d'Italia (ACI), Roma, dicembre 2007, su www.istat.it.

AA. VV. *Überprüfung der Relationstrassierung für Straßen der Kategoriengruppe A. FA 02.153 R93E des Bundesministers für Verkehr*, Zwischenbericht, Darmstadt, 1995.

Abate D., De Guglielmo M. L., Dell'Acqua G., Lamberti R., Lista A., *Efficacia degli Interventi di Traffic Calming in Ambito Urbano*, agli Atti del 17° Convegno Nazionale SIIV, Enna, 10-12 settembre 2008.

Abate D., Dell'Acqua G., *Driver Speed Behaviour at Rural Intersections*, in 6th APTE, March 18-20, 2009, Shanghai, China.

Abate D., Dell'Acqua G., Esposito T., Lamberti R., Coraggio G. *Operating Speed Model on Tangents of Two-Lane Rural Highways*, agli Atti del 4th International SIIV Congress, Advances in Transportation Infrastructures and Stakeholders Expectations, Palermo, 12-14 settembre 2007.

Abate D., Dell'Acqua G., Lamberti R., Coraggio G., *Driver Speed Behaviour on Tangent Sections of Two-Lane Rural Highways*, agli Atti del Transport Research Arena Europe, Ljubljana, Slovenia, 21-24 Aprile 2008

Abate D., Dell'Acqua G., Lamberti R., Coraggio G., *Effectiveness of Traffic Calming Devices in Urban Environment*, in 88th TRB Annual Meeting, January 11-15, 2009, Washington, DC.

Abate D., Dell'Acqua G., Lamberti R., *Road Layout Chose Using Fuzzy Inference Systems*, in 6th APTE, March 18-20, 2009, Shanghai, China.

Andueza P. J. *Mathematical Models of Vehicular Speed on Mountain Roads*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 1701, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000.

Bella F. *Driving simulation in virtual reality for work zone design on highway: a validation study*. Atti del XIV convegno nazionale SIIV, Firenze, 2004.

Bella F. *The evaluation of Design Consistency: Predicting Models of Operating Speed on Three-Dimensional Alignment from Tests on Driving Simulator*. 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, Chicago, U.S.A., 2005.

Bevilacqua A., Di Mino G., Nigrelli J. *An Experimental Investigation on the Relationship Between Speed and Road Geometry*. Atti del XIV Convegno Nazionale SIIV, Firenze, 2004.

Capaldo F. S., Grossi R., Tocchetti A. *Procedure e Tecniche per la valutazione della sicurezza stradale*. 54° Conferenza del Traffico e della Circolazione, ACI, Riva del Garda, ottobre 1998.

- Cardoso J. L. *Relations between accident frequency and speed consistency in Portuguese two-lane/two-way highways links*. International Symposium on Highway Geometric Design Practices, Conference Proceedings, Boston, Massachusetts, August 30 - September 1, 1995.
- Collins K.M., Krammes R.A. *Preliminary Validation of a Speed- Profile Model for Design Consistency Evaluation*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n.1523, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996.
- Crisman B., Fugaro L., Marchionna A., Roberti R. *Modello di previsione delle velocità praticate dagli utenti attraverso la definizione di una velocità ambientale*. Atti del XIII convegno nazionale SIV, Padova, 2003.
- Crisman B., Marchionna A., Perco P., Roberti R. *Modelli di previsione delle velocità operative. Rapporto conclusivo del Progetto di Ricerca IASPI (Interazione Ambiente Sicurezza nel Progetto delle Infrastrutture Stradali)*. Firenze, 2001.
- Crisman B., Marchionna A., Perco P., Roberti R. *Operating Speed Prediction Model for Two-Lane Rural Roads*. 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, Chicago, U.S.A., 2005.
- Crisman B., Marchionna A., Perco P., Roberti R. *Operating Speed Prediction Model for Two-Lane Rural Roads*. Proceedings of the 2nd SIV International congress, Firenze, 2004.
- Crisman B., Marchionna A., Perco P., Roberti R. *Verifica della congruenza di un tracciato stradale con il modello MOST e confronto con altre procedure adottate*. Atti di XI convegno nazionale SIV, Verona, 2001.
- De Luca M., Grossi R., Garofalo C. *Indagine sperimentale sulle velocità attuate dai guidatori. Un modello comportamentale del diagramma velocità*. Atti del XII Convegno Nazionale SIV, Parma, 2002.
- Dell'Acqua G., Abate D., *Experimental Research for the Evaluation of Driver Speed Behaviour on Two-Lane Rural Roads*, agli Atti del Joint International Conference 11th Meeting of the EURO Working Group on Transportation (EWGT), settembre 2006, Politecnico di Bari.
- Dell'Acqua G., Abate D., Lamberti R., *Deceleration at Intersections on Two-Lane Rural Highways*, agli Atti del 10th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation, Atene, Grecia, 27-31 maggio 2008.
- Dell'Acqua G., Abate D., Lamberti R., *Field Studies on Posted Speed Limits*, Agli atti dell'International Conference on Road Safety and Simulation, Roma, 7-9 novembre 2007.
- Dell'Acqua G., De Guglielmo M. L., Lamberti R., Abate D., *Valutazione del Comportamento del Conducente in Presenza di Porte di Accesso: Indagine Sperimentale*, agli Atti del III

Convegno Nazionale La Sicurezza sulle Strade della Città “Camminare in Periferia”, Lucca, 21-22 febbraio 2008.

Dell’Acqua G., Esposito T., Lamberti R., Abate D., Loiodice C., *Velocità Operative in Rettifilo*, Sulla rivista LeStrade Ed. LaFiaccola, marzo 2007.

Dell’Acqua G., Lamberti R., Abate D., *Driver Speed Behaviour on Two-Lane Rural Highways in Southern Italy*, agli Atti del Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington DC, USA, gennaio 2007.

Esposito T., Mauro R. *Fondamenti di Infrastrutture Viarie voll. 1 e 2*. Hevelius, Benevento, 2003.

Ferrari P., Giannini F. *Ingegneria Stradale. Corpo stradale e pavimentazione* - ISEDI.

Figuerola Medina A., Tarko A. P. *Speed Factors on Two-Lane Rural Highways in Free- Flow Conditions*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n.1912, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2005, pp. 39-46.

Fitzpatrick K., et al. *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*. Report FHWA-RD-99-171. FHWA, U.S. Department of Transportation, 2000.

Kerman J. A., et al. *Effects of road curvature on vehicle/driver behaviour*. Report by the Transportation Research Group for the Department of Transport, University of Southampton, 1982.

Krammes R. A., et al. *Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-Lane Highways*. Report FHWA-RD-94-034. FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 1994.

Krammes R. et al. *Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-Lane Highways*. Report FHWA-RD-95-034. FHWA, U.S. Department of Transportation, 1995.

Lamberti R., Abate D., De Guglielmo M. L., Dell’Acqua G., Galante F., Lista A., Mauriello F., Montella A., Perneti M., *Rural Higways Crossing Small Urban Communities: Crash Analysis, Speed Behavior Evaluation and Design of Perceptual Measures and Physical Devices for Traffic Calming*, in 88th TRB Annual Meeting, January 11-15, 2009, Washington, DC.

Lamberti R., Abate D., De Guglielmo M. L., Dell’Acqua G., Lista A., Montella A. *Comprtamento dei Guidatori in Presenza delle Porte di Accesso in Ambito Urbano*, agli Atti del 17° Convegno Nazionale SIIV, Enna, 10-12 settembre 2008.

Lamm R., Choueiri E. M. *Recommendations for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the state of New York*. In Transportation Research Record: journal of

- Transportation Research Board, n. 1122, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1987.
- Lamm R., Psarianos B., Mailaender T. *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1999.
- Leisch J. E. and Leisch. J. P. *New Concepts in Design Speed Application*. 631, TRB, Research Council, Washington, D.C., 1977, pp. 4-14.
- Leonardi S., Canale S. *Condizionamenti indotti dalle intersezioni a raso sulla viabilità extraurbana*. 2004, su www.stradelandia.it.
- Lunenfeld H., Alexander G. J. *A Users Guide To Positive Guidance*. Report FHWA-SA-90-017. FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 1990.
- Marchionna A., Perco P. *Operating Speed-Profile Prediction Model for Two-Lane Rural Roads in the Italian Context*. International Conference Road Safety and Simulation, RSS 2007, Rome, 7, 8, 9th November 2007.
- McFadden J., Elefteriadou L. *Evaluating Horizontal Alignment Design Consistency of Two-Lane Rural Highway: Development of New Procedure*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n.1737, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000.
- McLean J. R. *An Alternative To The Design Speed Concept For Low Speed Alignment Design*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 702, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1979, pp. 55-63.
- Misaghi P., Hassan Y. *Modeling Operating Speed and Speed Differential on Two-Lane Rural Roads*. Journal of Transportation Engineering, ASCE, giugno 2005, pp. 408-417.
- Ottesen J. and Krammes R.A. *Speed-Profile Model for a Design-Consistency Evaluation Procedure in the United States*. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n.1701, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 76-85.
- Perco P. *Desirable Length of Spiral Curves for Two-Lane Rural Roads*. Transportation Research Record, No.1961, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2006, pp.1-8.
- Perco P. *Influence of the General Character of the Horizontal Alignment on the Operating Speed of Two-Lane Rural Roads*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2008.
- Perco P., Robba A. *Evaluation of the Deceleration Rate for the Operating Speed-Profile Model*. In Proceedings of the 3rd SIIV International Congress, Bari, 2005.

Perco P., Robba A., Roberti R. *Deceleration Model for Two-Lane Rural Roads*. Advances in Transportation Studies. An International Journal, n. 11, Aracne, Roma, Aprile 2007, pp. 19-32.

Piras C., Pinna F. *Una progettazione stradale attenta al sistema binario "uomo-strada"*. Strade & Autostrade, n 58, EDI-CEM, Milano, luglio-agosto 2006, pp. 194-201.

Ventsel E.S. *Teoria delle probabilità*. EDIZIONI MIR.

Wilson T.D. *Road Safety by Design*. Journal of the Institute of Highway Engineers, vol. 15, 1968, pp. 23-33.